

UNIVERSIDAD SAN FRANCISCO DE QUITO USFQ

Colegio de Ciencias e Ingenierías

**Simulación de la propagación de incendios forestales y
modelo de dispersión de gases en el Distrito Metropolitano
de Quito**

Proyecto de Investigación

Esteban Nicolás Trujillo Hidalgo

Ingeniería Mecánica

Trabajo de titulación presentado como requisito
para la obtención del título de
Ingeniero Mecánico

Quito, 12 de diciembre de 2018

UNIVERSIDAD SAN FRANCISCO DE QUITO USFQ

COLEGIO DE CIENCIAS E INGENIERÍAS

HOJA DE CALIFICACIÓN DE TRABAJO DE TITULACIÓN

**Simulación de la propagación de incendios forestales y modelo de dispersión
de gases en el Distrito Metropolitano de Quito**

Esteban Nicolás Trujillo Hidalgo

Calificación:

Nombre del profesor, Título académico

Juan Sebastián Proaño, Ph.D.

Firma del profesor

Quito, 12 de diciembre de 2018

Derechos de Autor

Por medio del presente documento certifico que he leído todas las Políticas y Manuales de la Universidad San Francisco de Quito USFQ, incluyendo la Política de Propiedad Intelectual USFQ, y estoy de acuerdo con su contenido, por lo que los derechos de propiedad de intelectual del presente trabajo quedan sujetos a lo dispuesto en esas Políticas.

Asimismo, autorizo a la USFQ para que realice la digitalización y publicación de este trabajo en el repositorio virtual, de conformidad a lo dispuesto en el Art. 144 de la Ley Orgánica de Educación Superior.

Firma del estudiante: _____

Nombres y apellidos: Esteban Nicolás Trujillo Hidalgo

Código: 00116732

Cédula de Identidad: 1718920224

Lugar y Fecha: Quito, 12 de diciembre de 2018

AGRADECIMIENTOS

Agradezco a mi familia por la oportunidad que me brindaron a través de la carrera universitaria para que el desarrollo de este proyecto sea posible.

Agradezco a mis compañeros de la carrera de Ingeniería Mecánica, por el apoyo y su visión externa en el desarrollo del proyecto.

Agradezco al departamento de Ingeniería Mecánica y a la Universidad San Francisco de Quito por la enseñanza de todos los conocimientos académicos y éticos aplicados en este proyecto.

Finalmente, agradezco a Paul Dehousse, asesor del programa Proyecto de Recuperación Agro – ambiental del Volcán Ilaló y a René Parra, director del departamento de Ingeniería Ambiental, por la información proporcionada para este proyecto.

RESUMEN

Los incendios forestales en el Distrito Metropolitano de Quito, específicamente en el Volcán Ilaló, han provocado pérdidas materiales cuantiosas para la gente que habita en el sector e inseguridad para la población. En este proyecto se propuso simular la propagación del fuego en el incendio forestal ocurrido el día 14 de septiembre de 2015 en el Volcán Ilaló – Sector La Toglla, utilizando los softwares QGIS y FARSITE. Adicionalmente, se propuso desarrollar un modelo de dispersión de los gases de combustión producidos en este incendio y seguir su trayectoria a lo largo del día. Finalmente, se propuso estudiar soluciones alternativas para contener la propagación del fuego, una vez que se validó la simulación en FARSITE. La metodología desarrollada para la simulación en FARSITE fue proporcionar información topográfica, tipos y distribución de combustibles, condiciones meteorológicas y velocidad y dirección del viento del 14 de septiembre de 2015 del Volcán Ilaló. Por otro lado, en la metodología para el modelo de dispersión en COMSOL, se modeló el Ilaló como una geometría en tres dimensiones a partir de sus curvas de nivel. En este modelo, se determinó que el flujo del viento fue turbulento y se utilizó un modelo $k-\varepsilon$ para su desarrollo. El campo vectorial del viento fue interpolado en función de las dimensiones superficiales de la geometría para lograr obtener la velocidad en cada punto del dominio. Adicionalmente, se asignó un flujo másico por unidad de área para cada hora del día. Finalmente, se utilizó el estudio de transporte de especies diluidas para modelar el fenómeno. Como última metodología, se colocaron barreras cortafuegos para la contención de la propagación del fuego en el incendio. Los resultados del estudio de FARSITE pudieron ser validados con la información oficial de los contaminantes expulsados a la atmósfera. Estos datos se utilizaron para la simulación en COMSOL, cuyos resultados no fueron validados por falta de información real sobre la concentración de los gases en el Ilaló. Finalmente, los métodos de contención desarrollados mostraron una disminución del área afectada y toneladas de contaminantes expulsados al ambiente, en comparación con las condiciones reales en el Volcán Ilaló del 14 de septiembre de 2015.

ABSTRACT

Forest fires in the Metropolitan District of Quito, specifically in the Ilaló Volcano, have caused substantial material losses and insecurity for the population. In this project, it was proposed to simulate the propagation of fire in the forest fire that occurred on September 14, 2015 in the Ilaló Volcano, using two software: QGIS and FARSITE. Additionally, it was proposed to develop a dispersion model of the combustion gases produced by this fire and follow its trajectory throughout the day. Finally, it was proposed to study alternative solutions to contain fire spreading, once the simulation was validated in FARSITE. The methodology developed for FARSITE simulation was to provide topographic information, fuel types and distribution, meteorological conditions and wind speed and direction of September 14, 2015 in the Ilaló Volcano. On the other hand, in the methodology for the dispersion model in COMSOL, the Ilaló Volcano was modeled as a three-dimensional geometry based on its topographical information. In this model, it was determined that wind described a turbulent flow and a $k-\varepsilon$ model was used for its development. The vector field of the wind was interpolated according to the surface dimensions of the geometry in order to obtain the velocity at each point of the domain. Additionally, a mass flow per unit area was assigned for each hour of the day. Finally, the transport study of diluted species was used to model the phenomenon. As a last methodology, firewalls were placed to contain fire spreading. The results of the FARSITE study were validated with the official information of the pollutants expelled to the atmosphere. These data were used for the simulation in COMSOL, these results were not validated because of lack of real information on the concentration of gases in Ilaló Volcano. Finally, the containment methods developed showed a reduction of the affected area and tons of pollutants expelled into the environment, in comparison with the actual conditions at the Ilaló Volcano on September 14, 2015.

Tabla de Contenido

<i>ÍNDICE DE TABLAS</i>	8
<i>ÍNDICE DE FIGURAS</i>	11
1. INTRODUCCIÓN	14
2. MARCO TEÓRICO	17
2.1 Verificación de softwares	17
2.1.1 Verificación de FARSITE para la propagación del incendio forestal.....	17
2.1.2 Validación del modelo desarrollado	21
2.1.3 Verificación de COMSOL para la dispersión de gases de combustión...	21
2.2 Mitigación de incendios forestales	27
2.2.1 Solución alternativa para contener la propagación del incendio forestal	27
3. METODOLOGÍA	30
3.1 Simulación de la propagación del fuego en FARSITE.....	31
3.1.1 Topografía del Volcán Ilaló	31
3.1.2 Tipo de vegetación en el Volcán Ilaló	33
3.1.3 Campo vectorial de velocidades del viento	36
3.1.4 Condiciones meteorológicas del 14 de septiembre de 2015	37
3.1.5 Punto de ignición y duración de la simulación	39
3.2 Simulación del modelo de dispersión de gases en COMSOL	40
3.2.1 Geometría del Volcán Ilaló	40
3.2.2 Primer estudio: soluciones de velocidad del fluido	42
3.2.3 Segundo estudio: solución del transporte de la especie	47
3.3 Método de contención de la propagación del incendio forestal	50
4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	52
4.1 Propagación del fuego en FARSITE.....	52
4.1.1 Resultados de la simulación en FARSITE	52
4.1.2 Validación del modelo desarrollado en FARSITE	61
4.2 Métodos de contención de la propagación del incendio	61
4.2.1 Primer método de contención	61

4.2.2 Segundo método de contención	64
4.2.3 Comparación con resultados obtenidos sin aplicar los métodos de contención.....	66
4.3 Modelo de dispersión de gases de combustión en COMSOL	68
4.3.1 Resultados del modelo de dispersión de CO y CO ₂	68
4.3.2 Validación del modelo de dispersión desarrollado en COMSOL	78
5. <i>CONCLUSIONES</i>	80
6. <i>RECOMENDACIONES</i>	82
7. <i>REFERENCIAS</i>	83
<i>ANEXOS</i>	87

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Modelo de combustible y cobertura vegetal asociado al tipo de vegetación del Volcán Ilaló	35
Tabla 2. Condiciones meteorológicas del 13, 14 y 15 de septiembre de 2015 en el Volcán Ilaló.....	39
Tabla 3. Valores de coeficientes de regresión para cada hora del intervalo de estudio.....	45
Tabla 4. Área afectada por el incendio [ha] en cada hora del día 14 de septiembre de 2015	55
Tabla 5. Flujo másico de PM _{2.5} para cada hora de duración del incendio del 14 de septiembre de 2015 en La Toglla.....	58
Tabla 6. Flujo másico de CO para cada hora de duración del incendio del 14 de septiembre de 2015 en La Toglla.....	59
Tabla 7. Flujo másico de CO ₂ para cada hora de duración del incendio del 14 de septiembre de 2015 en La Toglla.....	60
Tabla 8. Resultados de la aplicación de los dos métodos de contención	66
Tabla 9. Flujo molar de CO y CO ₂ para cada hora de duración del incendio forestal	70
Tabla 10. Área afectada por el incendio [ha] aplicando el primer método de contención.....	91
Tabla 11. Flujo másico de PM _{2.5} para cada hora de duración aplicando el primer método de contención.....	92
Tabla 12. Flujo másico de CO para cada hora de duración aplicando el primer método de contención	93
Tabla 13. Flujo másico de CO ₂ para cada hora de duración aplicando el primer método de contención	94
Tabla 14. Área afectada por el incendio [ha] aplicando el segundo método de contención.....	95
Tabla 15. Flujo másico de PM _{2.5} para cada hora de duración aplicando el segundo método de contención	96
Tabla 16. Flujo másico de CO para cada hora de duración aplicando el segundo método de contención	97

Tabla 17. Flujo másico de CO ₂ para cada hora de duración aplicando el segundo método de contención	98
--	----

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Esquema del principio de Huygens con ondas elípticas. (A) Condiciones uniformes aplicadas a ondas de tamaño constante manteniendo constante la forma elíptica de la propagación en el tiempo. (B) Condiciones no uniformes mostrando la dependencia del tamaño de la onda con el tipo de combustible presente orientando en el sentido del vector de viento (Finney, 1998).	18
Figura 2. Distribución de un área de cortafuegos	28
Figura 3. Ubicación Volcán Ilaló y sus alrededores (Google Earth, s/f)	30
Figura 4. (a) Curvas de nivel del Volcán Ilaló y sus alrededores. (b) Intersección del dominio elegido con las curvas de nivel del Volcán Ilaló.	32
Figura 5. Mapa topográfico del Volcán Ilaló dentro del dominio elegido	32
Figura 6. Archivo ráster con datos de elevación del Ilaló (m.s.n.m.)	33
Figura 7. Velocidad [km/h] y dirección del viento en el Volcán Ilaló a las 8:00 AM del 14 de septiembre de 2015	37
Figura 8. Modelado tridimensional del Volcán Ilaló	40
Figura 9. Volumen de aire en la parte superior del Volcán Ilaló (dominio de estudio)	41
Figura 10. Velocidad del viento en la dirección x (eje z) [m/s] vs. Dominio extendido del Volcán Ilaló (plano xy) [m]	43
Figura 11. Velocidad del viento en la dirección y (eje z) [m/s] vs. Dominio extendido del Volcán Ilaló (plano xy) [m]	44
Figura 12. Área afectada a las 6 AM dibujada en el dominio	48
Figura 13. Área afectada a las 7 AM dibujada en el dominio	48
Figura 14. Mallado utilizado por la simulación en COMSOL	49
Figura 15. Distribución de los diferentes tipos de vegetación en el Volcán Ilaló	52
Figura 16. Área afectada por el incendio (zona roja) representada en un mapa de distribución y tipos de combustibles del Ilaló, mostrando una propagación no homogénea por los distintos combustibles presentes	54
Figura 17. Tasa de emisión de $PM_{2.5}$ [ton/h] vs. Hora del día [h]	56
Figura 18. Tasa de emisión de CO [ton/h] vs. Hora del día [h]	57
Figura 19. Tasa de emisión de CO_2 [ton/h] vs. Hora del día [h]	57
Figura 20. Primer método de contención de la propagación del incendio forestal (1 barrera cortafuegos)	62

Figura 21. Área afectada por el incendio (zona roja) aplicando el primer método de contención mostrando un menor impacto comparado a la figura 16.....	63
Figura 22. Segundo método de contención de la propagación del incendio forestal (2 barreras cortafuegos)	64
Figura 23. Área afectada por el incendio (zona roja) aplicando el segundo método de contención mostrando un impacto menor comparado a la figura 16.....	65
Figura 24. Resultado de métodos de contención mostrando la disminución de los contaminantes producidos.....	67
Figura 25. Magnitud de velocidad [m/s] del campo vectorial del viento en la hora 6.	69
Figura 26. Magnitud de velocidad [m/s] del campo vectorial del viento en la hora 12	69
Figura 27. Concentración de CO [mol/m ³] en la hora 6 del 14 de septiembre de 2015	71
Figura 28. Concentración de CO [mol/m ³] en la hora 7 del 14 de septiembre de 2015	72
Figura 29. Concentración de CO [mol/m ³] en la hora 8 del 14 de septiembre de 2015	72
Figura 30. Concentración de CO [mol/m ³] en la hora 9 del 14 de septiembre de 2015	73
Figura 31. Concentración de CO [mol/m ³] en la hora 9 del 14 de septiembre de 2015	73
Figura 32. Concentración de CO [mol/m ³] en la hora 11 del 14 de septiembre de 2015.....	74
Figura 33. Concentración de CO [mol/m ³] en la hora 12 del 14 de septiembre de 2015.....	74
Figura 34. Concentración de CO [mol/m ³] en la hora 13 del 14 de septiembre de 2015.....	75
Figura 35. Concentración de CO [mol/m ³] en la hora 14 del 14 de septiembre de 2015.....	75
Figura 36. Velocidad [km/h] y dirección del viento en el Volcán Ilaló a las 6:00 AM del 14 de septiembre de 2015.....	87
Figura 37. Velocidad [km/h] y dirección del viento en el Volcán Ilaló a las 7:00 AM del 14 de septiembre de 2015.....	87

Figura 38. Velocidad [km/h] y dirección del viento en el Volcán Ilaló a las 9:00 AM del 14 de septiembre de 2015.....	88
Figura 39. Velocidad [km/h] y dirección del viento en el Volcán Ilaló a las 10:00 AM del 14 de septiembre de 2015.....	88
Figura 40. Velocidad [km/h] y dirección del viento en el Volcán Ilaló a las 11:00 AM del 14 de septiembre de 2015.....	89
Figura 41. Velocidad [km/h] y dirección del viento en el Volcán Ilaló a las 12:00 AM del 14 de septiembre de 2015.....	89
Figura 42. Velocidad [km/h] y dirección del viento en el Volcán Ilaló a las 13:00 AM del 14 de septiembre de 2015.....	90
Figura 43. Velocidad [km/h] y dirección del viento en el Volcán Ilaló a las 14:00 AM del 14 de septiembre de 2015.....	90
Figura 44. Concentración de CO ₂ [mol/m ³] en la hora 6 del 14 de septiembre de 2015.....	99
Figura 45. Concentración de CO ₂ [mol/m ³] en la hora 7 del 14 de septiembre de 2015.....	99
Figura 46. Concentración de CO ₂ [mol/m ³] en la hora 8 del 14 de septiembre de 2015.....	100
Figura 47. Concentración de CO ₂ [mol/m ³] en la hora 9 del 14 de septiembre de 2015.....	100
Figura 48. Concentración de CO ₂ [mol/m ³] en la hora 10 del 14 de septiembre de 2015.....	101
Figura 49. Concentración de CO ₂ [mol/m ³] en la hora 11 del 14 de septiembre de 2015.....	101
Figura 50. Concentración de CO ₂ [mol/m ³] en la hora 12 del 14 de septiembre de 2015.....	102
Figura 51. Concentración de CO ₂ [mol/m ³] en la hora 13 del 14 de septiembre de 2015.....	102
Figura 52. Concentración de CO ₂ [mol/m ³] en la hora 14 del 14 de septiembre de 2015.....	103

1. INTRODUCCIÓN

Los incendios forestales ponen en riesgo la seguridad de las personas, causando pérdidas materiales cuantiosas a las comunidades emergentes que habitan las zonas de alto riesgo de incendios (Fernandez-Pello, 2017). Se producen en épocas del año cuando no existe presencia de lluvia y la temperatura ambiente está por encima del promedio registrado en el año, condiciones que se presentan comúnmente en el verano (INAMHI, 2014). La estación de verano en la región interandina del Ecuador, dentro de la cual se encuentra el Distrito Metropolitano de Quito, se presenta entre los meses de junio hasta agosto, siendo los meses de enero hasta mayo y septiembre hasta diciembre, períodos lluviosos en el año (INAMHI, 2014). Sin embargo, desde el año 2010 los períodos lluviosos y secos en el año han sido fluctuantes en cuanto a su tiempo de permanencia (Redacción Quito, 2015). Este cambio se pudo evidenciar en el año 2015, en el cual el invierno se ‘retrasó’, provocando la ausencia de precipitaciones en el mes de septiembre (Redacción Quito, 2015). Como consecuencia de la sequía presentada en el mes de septiembre de 2015 y de ciertos sucesos lamentables, se presentaron numerosos incendios forestales a lo largo del Distrito Metropolitano de Quito, especialmente en el día 14, afectando localidades como: Cerro Ilaló, Cruz Loma, Cerro Auqui, Tumbaco, Lloa, Quinche, San José de Minas. Entre todas las locaciones sumaron 3102 hectáreas afectadas en el Distrito (El Telégrafo, 2015). Adicionalmente a los incendios presentes en las localidades montañosas, se visualizaron nubes compuestas por gases de combustión y material particulado producidos por los incendios presentes en la zona urbana de Quito, lo cual resultó incómodo para las personas que vivían y trabajaban en ese sector de la ciudad (El Telégrafo, 2015). Desesperados intentos de extinguir el fuego fueron ejecutados por parte del

gobierno y el cuerpo de bomberos, acudiendo al lugar con los implementos necesarios y helicópteros llenos de agua dispuesta a ser esparcida en el lugar afectado. Incluso se estudió la alternativa de pedir ayuda a los países que conforman la UNASUR para controlar los lamentables sucesos (Heredia, 2015).

En los últimos años, se han estudiado las áreas de terreno afectadas por los incendios forestales en el Ecuador, para realizar un mapa de riesgos que incluya estas zonas (Secretaría de Gestión de Riesgos, 2013). Para complementar los estudios que se están realizando sobre incendios forestales, se considera importante la implementación de un método que permita pronosticar y prevenir la generación de estos incendios en lugares susceptibles a este fenómeno. La simulación por computadora se presenta como herramienta alternativa al estudio de los incendios forestales, de manera que se puedan recrear eventos que sucedieron en el pasado y estudiar diversas soluciones que pudieron tomarse, y considerarlas para casos futuros.

Existen varias técnicas de simulación y visualización de los incendios forestales. QGIS es un sistema de información geográfica que permite analizar y visualizar datos experimentales de campos vectoriales de viento, topografía del lugar y tipo de vegetación para ser introducidos en un software de simulación de incendios, por ejemplo, FARSITE, para recrear la propagación del fuego de un evento que ya ha ocurrido (Williams, Song, & Williams, 2013). Los gases de combustión producidos por los incendios forestales también pueden ser estudiados al simular la dispersión de estos cuando interactúan con el campo vectorial del viento y condiciones meteorológicas, en el momento de interés (Heriyanto, Syaufina, & Sobri, 2015). Cabe recalcar que las simulaciones deben ser validadas, de manera

que la metodología que se está utilizando compruebe que puede usarse como un modelo predictivo en condiciones reales, para estos eventos (Van Hees, 2013).

Por lo tanto, considerando los antecedentes y las herramientas disponibles, en este trabajo se propone realizar una simulación de la propagación del incendio forestal ocurrido en el Cerro Ilaló – Sector la Toglla, perteneciente al Distrito Metropolitano de Quito, el 14 de septiembre de 2015 utilizando los softwares QGIS y FARSITE de manera que, a partir de datos topográficos, meteorológicos y de vegetación presente, se pueda simular la propagación del incendio ocurrido. Adicionalmente, en busca de complementar una metodología más amplia, se propone el objetivo de realizar una simulación CFD (Computational Fluid Dynamics) en COMSOL que permita estudiar la dispersión de los gases de combustión producto del incendio, utilizando los datos obtenidos a partir de la simulación en FARSITE. Para validar la simulación, se obtendrán datos reales de material particulado y gases de combustión generados en el incendio forestal del 14 de septiembre de 2015 y se compararán con la simulación obtenida en FARSITE y COMSOL. Finalmente, como objetivos secundarios, se propone estudiar soluciones alternativas para evitar los incendios y contenerlos para detener su propagación, de manera que el impacto en áreas afectadas y gases de combustión producidos se puedan minimizar.

1. MARCO TEÓRICO

Dentro de todo proceso de simulación, debe existir un proceso de verificación y validación para que el modelo sea predictivo en condiciones reales (Van Hees, 2013). Para ello, a este último se lo divide en dos subprocesos:

- Verificación
- Validación

En el proceso de verificación, se realiza un estudio sobre las ecuaciones fundamentales que usan los programas para correr la simulación. Por el otro lado, en el proceso de validación, se compara los resultados obtenidos de la simulación con datos experimentales reales obtenidos en el día de estudio escogido.(Van Hees, 2013). De esta manera, se verifica la confiabilidad del modelo predictivo.

1.1 Verificación de softwares

1.1.1 Verificación de FARSITE para la propagación del incendio forestal

En cuanto al proceso de verificación para la simulación de la propagación de los incendios, se revisa la documentación técnica de FARSITE, de manera que se pueda conocer los principios físicos y matemáticos que utiliza. FARSITE es un software que permite simular la propagación de los incendios forestales y obtener resultados de áreas afectadas, velocidad de propagación y, de acuerdo a esto, estudiar estrategias de contingencia que permiten disminuir el impacto de los incendios al disminuir la propagación acelerada en los bosques (Finney, 1998). El modelo FARSITE (Fire Area Simulator) simula el incremento del incendio como la propagación de una onda elíptica según el principio de Huygens, representado gráficamente en la figura 1.

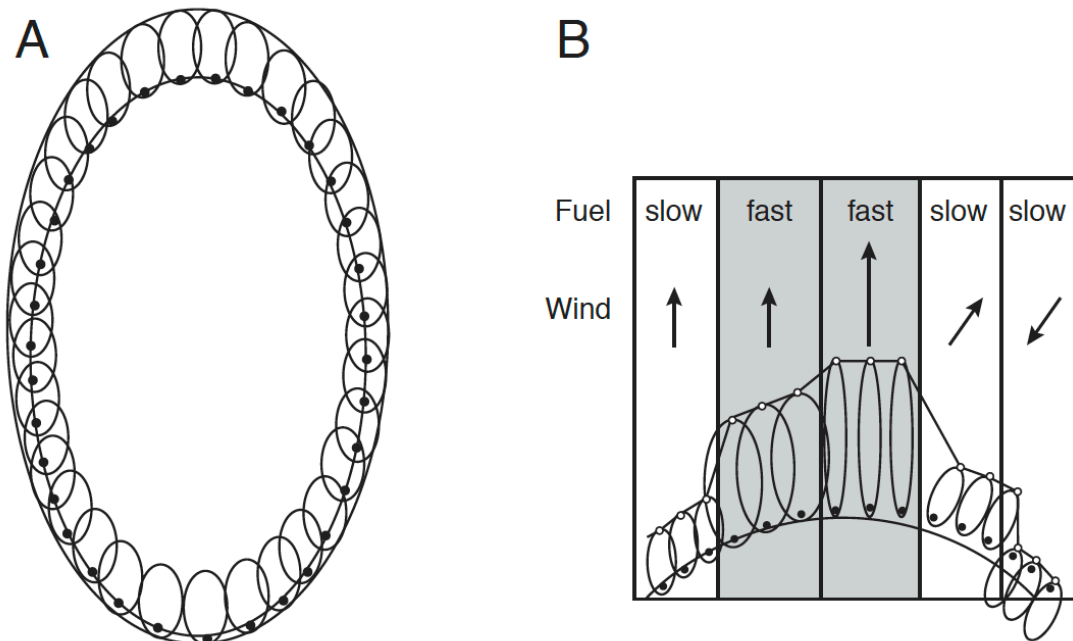


Figura 1. Esquema del principio de Huygens con ondas elípticas. (A) Condiciones uniformes aplicadas a ondas de tamaño constante manteniendo constante la forma elíptica de la propagación en el tiempo. (B) Condiciones no uniformes mostrando la dependencia del tamaño de la onda con el tipo de combustible presente orientando en el sentido del vector de viento (Finney, 1998).

El principio de Huygens dicta que el frente de las ondas está conformado por superficies poligonales infinitesimales sobre su línea. Aplicando este principio al crecimiento de los incendios, el frente de fuego se propaga como una expansión continua de un polígono infinitesimal en diferentes intervalos de tiempo, los cuales están definidos como vértices en dos dimensiones. Estos vértices aumentan conforme el incendio se propaga, es decir, el polígono se expande. Esta expansión se determina al multiplicar la tasa de propagación, por la dirección de los vértices y

el intervalo de tiempo. Estas variables se obtienen a partir de las condiciones ambientales que necesita FARSITE como variables de entrada, y así dar una dirección y orientación a la onda elíptica, es decir, a la propagación del incendio (Finney, 1998).

FARSITE necesita un mínimo de variables de entrada para correr la simulación, las cuales describen el lugar que se desea analizar en términos de sus condiciones ambientales y meteorológicas. Las variables son (Williams et al., 2013):

- Topografía del lugar elegido
- Condiciones Meteorológicas (precipitación, humedad, etc.)
- Vegetación del lugar
- Velocidad del viento (campo vectorial)

Es estrictamente necesario que los archivos de topografía del lugar elegido y vegetación sean introducidos al programa como archivos de tipo ráster. Los archivos ráster guardan gran cantidad de información, de acuerdo con un código de colores determinado por el usuario, según el tipo de información que desea guardar. Dentro de estos archivos se puede elegir la precisión que se desea manejar al cambiar el tamaño del píxel y los diferentes datos que se desean almacenar en una escala de colores determinada por distintos valores (USDA Forest Service, 2007).

Cabe recalcar que la vegetación del lugar es de suma importancia dentro del estudio, pues proporciona información sobre los combustibles presentes en el lugar y, a partir de estos, se puede estudiar la afectación a la propagación del incendio cuando interactúan con la elevación e inclinación de la montaña (Williams et al., 2013).

Por otro lado, las variables de campo vectorial del viento y condiciones meteorológicas del lugar pueden ser introducidas como un archivo de texto normal,

escribiendo los valores necesarios según el formato predeterminado (USDA Forest Service, 2007).

De manera que FARSITE pueda realizar la simulación pertinente, necesita un intervalo de tiempo dentro del cual realizar los cálculos respectivos. Este intervalo corresponde a la duración del incendio que se está estudiando, empezando desde el momento y lugar de ignición (Finney, 1998).

Por otro lado, para una mejor visualización de los resultados obtenidos del proceso de simulación, FARSITE incorpora dentro de su análisis tablas y gráficos que presentan datos relevantes sobre las principales variables a estudiar en un incendio forestal, facilitando la interpretación de los resultados calculados (Finney, 1998). Dentro de los resultados más relevantes para el estudio se encuentran:

- **Área quemada:** Medida del área afectada por el incendio forestal (Finney, 1998).
- **Toneladas de material particulado producidas ($PM_{2.5}$ y PM_{10}):** Cantidad de partículas con diámetros mayores a 2.5 y 10 nm, respectivamente, suspendidas en el aire (Liang, 2013).
- **Toneladas de monóxido y dióxido de carbono producidas (CO y CO_2):** Cantidad de gases presentes en la atmósfera provenientes de la combustión (Liang, 2013).

Adicionalmente, es importante definir dos fases esenciales dentro del proceso de combustión ocurrido en los incendios forestales. Estos son:

- **Smoldering:** es una forma de combustión que se caracteriza por ser lenta y se da a baja temperatura. Se mantiene del calor proveniente de la reacción del oxígeno con la superficie de la fase condensada del combustible. Puede arder en largos períodos de tiempo (Wang et al., 2016).

- Flaming: esta forma de combustión es caracterizada por presentarse en altas temperaturas y en la fase gaseosa del combustible (Wang et al., 2016).

1.1.2 Validación del modelo desarrollado

Ahora bien, haciendo referencia a fase de validación de la simulación, es necesario calcular que tan cercanos se encuentran los datos obtenidos (experimental) con los datos reales (teórico), con el fin de analizar la confiabilidad y exactitud del modelo desarrollado. Para este análisis, se utiliza el error experimental porcentual, el cual relaciona las valores teóricos y experimentales, definido por (University of Iowa, 2017):

$$\%_{error} = \frac{V_{experimental} - V_{teórico}}{V_{teórico}} * 100 \quad (1)$$

En la ecuación (1):

$V_{experimental}$, es el valor obtenido a través de la simulación.

$V_{teórico}$, es el valor real con el que se realizará la validación.

1.1.3 Verificación de COMSOL para la dispersión de gases de combustión

COMSOL Multiphysics es una herramienta de simulación para modelar comportamientos y procesos que ocurren en todos los campos de la ingeniería, manufactura e investigación científica, además de contar con su módulo de conexión dos o más estudios físicos, el cual permite estudiar el comportamiento cuando dos o más fenómenos se encuentran en interacción (COMSOL, 2012).

Dentro del proceso de verificación de este software, es importante mencionar que se utiliza su módulo CFD para estudiar los fenómenos de interés en este proyecto.

Computational Fluid Dynamics (CFD) es una herramienta de simulación controlada por computadora que permite estudiar el comportamiento de sistemas que incluyen mecánica de fluidos, transferencia de calor y otros fenómenos físicos similares (Anderson & Wendt, 1995). El estudio CFD incluye las ecuaciones gobernantes presentadas a continuación, necesarias para resolver los distintos modelos que se presentan en un estudio, dentro de la mecánica de fluidos y termodinámica.

Conservación de la masa (Cengel, 2002):

$$\dot{m}_{in} - \dot{m}_{out} = \frac{dm_{CV}}{dt} \quad (2)$$

Ecuaciones de Navier-Stokes (Munson, 2014):

$$\rho \left(\frac{\delta V}{\delta t} + V * \nabla V \right) = -\nabla p + \rho g + \mu \nabla^2 V \quad (3)$$

Conservación de la energía (Cengel, 2002):

$$\dot{Q}_{in} + \dot{W}_{in} + \sum_{in} \dot{m}_{in} \left(h + \frac{v^2}{2} + gz \right) = \dot{Q}_{out} + \dot{W}_{out} + \sum_{out} \dot{m}_{out} \left(h + \frac{v^2}{2} + gz \right) \quad (4)$$

Ahora bien, el modelo de dispersión de gases de combustión se compone de dos fenómenos físicos principales, siendo estos el flujo de un fluido dentro de un volumen determinado y el transporte de la especie diluida, o gas de combustión, cuando interacciona con el fluido (Fiates et al., 2016).

Dentro del estudio del flujo del fluido, siguiendo los principios de la mecánica de fluidos, se puede comportar de dos maneras diferentes, como flujo laminar o como flujo turbulento, en dependencia del valor del número de Reynolds (Munson,

2014). La determinación del tipo de flujo se realiza de acuerdo con los siguientes intervalos del número de Reynolds (Munson, 2014):

El flujo es laminar si:

$$Re < 300\,000 \quad (5)$$

El flujo se encuentra en estado de transición de laminar a turbulento si:

$$300\,000 < Re < 500\,000 \quad (6)$$

El flujo es turbulento si:

$$Re > 5000 \quad (7)$$

El número de Reynolds se define como (Munson, 2014):

$$Re = \frac{\rho V L_c}{\mu} \quad (8)$$

Las variables dentro de la ecuación (8) corresponden a:

ρ es la densidad del fluido en $[\text{kg}/\text{m}^3]$.

V es la velocidad del fluido en $[\text{m}/\text{s}]$.

L_c es la longitud característica de la geometría en análisis en $[\text{m}]$.

μ es la viscosidad dinámica del fluido en $[\text{kg}/\text{ms}]$.

Dentro del flujo turbulento, existen varios modelos que se pueden aplicar para el cálculo. Para este proyecto, se eligió el modelo de flujo turbulento $k-\varepsilon$, caracterizado por sus buenos resultados cuando el gradiente de presión es mínimo (Wilcox, 1998). El modelo de flujo turbulento $k-\varepsilon$ está basado en dos principios fundamentales que modelan las ecuaciones de transporte para representar las

propiedades turbulentas del flujo, considerando efectos de convección y difusión (Bardina et al., 1997).

La primera variable de transporte corresponde a la energía cinética turbulenta representada por la letra k . Por otro lado, la segunda variable de transporte es la tasa de disipación turbulenta, representada por la letra ε (Bardina et al., 1997).

Adicionalmente, es importante mencionar que, al tratarse de un estudio realizado en el Volcán Ilaló, la velocidad del fluido tiene un rol importante dentro del dominio de estudio y se debe considerar los cambios de velocidad que se dan dentro del mismo. Para ello, se debe introducir el concepto de flujo y velocidad de un fluido en un terreno de geometría compleja, como lo es el Ilaló, por su alta variación en las características de la superficie y el cambio en la elevación (Lange et al., 2016).

Es conocido que la velocidad del viento varía con la altura y, si la geometría que se está analizando es una montaña, varía con respecto a un punto de referencia en el suelo, donde la velocidad es cero (Bitsuamlak, Stathopoulos, & Bédard, 2004). De acuerdo con este principio, existen ciertas formas de evaluar la velocidad del viento, si la geometría en la que se encuentra interactuando es compleja. Uno de los métodos usados es aplicar la función de potencia presentada en la ecuación (9), la cual ayuda a modelar el comportamiento de la velocidad del viento en diferentes alturas (Vanek et al., 2008).

$$V(z) = V(z_0) * \left(\frac{z}{z_0}\right)^\alpha \quad (9)$$

Donde:

$V(z)$ es la velocidad del viento a una altura z deseada, en [m/s]

$V(z_0)$ es la velocidad del viento a una altura referencial z_0 , en [m/s]

α es un coeficiente que puede variar entre 0.1 y 0.7.

Observando la ecuación (9) se puede apreciar que la velocidad del viento aumenta cuando aumenta la altura, siguiendo el comportamiento requerido para desarrollar el modelo correcto de dispersión de gases de combustión.

Por otro lado, dentro del modelo de transporte de la especie, existen dos métodos que pueden ser usados para analizar la interacción de los dos estudios presentados a continuación.

Transporte de especies diluidas: estudia la concentración de un soluto diluido en un solvente, caracterizado por especies disueltas en un gas, líquido o sólido. En este estudio se debe conocer y distinguir el soluto y el solvente dentro de la dilución (COMSOL, 2012).

Transporte de especies concentradas: este estudio se enfoca en mezclas gaseosas y líquidas en las que las concentraciones de las especies son del mismo orden de magnitud y ninguna de las especies puede ser identificada como solvente (COMSOL, 2012).

Adicionalmente, es importante definir ciertos términos que forman parte del desarrollo del modelo de dispersión de gases e influyen de manera directa los resultados esperados.

El fenómeno de transporte de especies diluidas se rige por el principio de difusión, explicado por la primera ley de Fick. Esta ley dicta que el flujo molar debido a la difusión es directamente proporcional al gradiente de concentración y que la

tasa de cambio de la concentración en un punto en el espacio es proporcional a la segunda derivada de la concentración en el espacio (Chang, 2009). En la ecuación (10) se presenta la expresión matemática de la primera ley de Fick.

$$N_i = -D_i \nabla c_i \quad (10)$$

En la ecuación (10):

i , corresponde al tipo de especie o gas de combustión que se está analizando.

N_i , corresponde al flujo molar de la especie en $[\text{mol}/\text{m}^2\text{s}]$.

D_i , corresponde al coeficiente de difusión de la especie en el fluido de interacción en $[\text{m}^2/\text{s}]$.

c_i , corresponde a la concentración de la especie en $[\text{mol}/\text{m}^3]$.

Adicionalmente, expresando la ecuación de continuidad de la masa como:

$$\frac{\partial c_i}{\partial t} + \nabla \cdot N_i = 0 \quad (11)$$

Y reemplazando la ecuación (10) en (11), se puede derivar la segunda ley de Fick que se expresa como:

$$\frac{\partial c_i}{\partial t} = D_i \nabla^2 c_i \quad (12)$$

En la ecuación (12) se puede asumir que el término D_i es constante cuando se trata de transporte de especies diluidas. Esta consideración es una buena aproximación cuando se analiza la difusión de especies diluidas en su fase gaseosa (Chang, 2009).

En la ecuación (10), se presentan las variables necesarias para obtener una solución del estudio en COMSOL. Los parámetros necesarios son:

Flujo molar por metro cuadrado del gas de combustión: en este caso el área que se debe tener en cuenta corresponde al resultado del área afectada por el incendio obtenida a través de FARSITE.

Coefficiente de difusión de la especie en el fluido: en este parámetro se debe tomar en cuenta la difusión del gas de combustión en estudio (CO o CO₂) en el aire.

1.2 Mitigación de incendios forestales

1.2.1 Solución alternativa para contener la propagación del incendio forestal

Uno de los métodos de contención utilizados para controlar la propagación de los incendios en zonas con alta densidad de vegetación son los cortafuegos. Los cortafuegos son caminos o delimitaciones de terreno donde no existe presencia de ningún combustible (Weir, Bidwell, Stevens, & Mustain, 2015). Estos caminos suelen ser usados como vías de acceso y tránsito para automóviles y camiones de bomberos que necesiten acudir a la zona a controlar el incendio (Department of Fire & Emergency Services, s/f). La distribución normal de un cortafuegos se presenta en la figura 2.

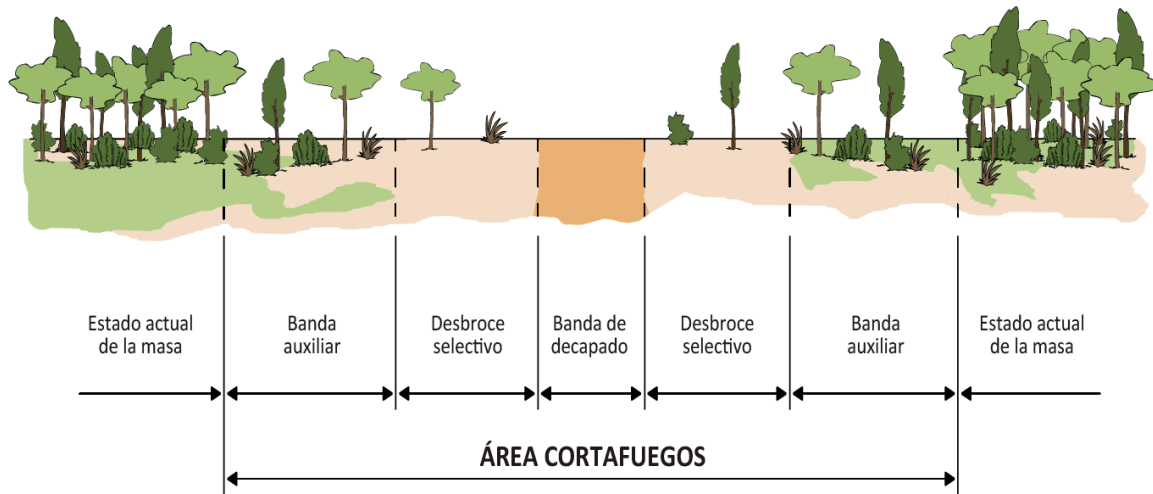


Figura 2. Distribución de un área de cortafuegos

En la figura 2 se puede apreciar que el área de cortafuegos consta de tres regiones (Navarro et al., 2015):

- Banda de decapado: consiste en eliminar toda la vegetación existente, hasta que sólo permanezca el suelo mineral.
- Desbroce selectivo: está situado en ambos lados de la banda de decapado. Consiste en un desbroce total o selectivo de la vegetación existente.
- Banda auxiliar: consiste en realizar un apeo parcial de la vegetación, menor a la presentada en el área de desbroce.

Adicionalmente, los cortafuegos son contruidos en zonas bajas y a lo largo de los cambios de elevación en la montaña, de manera que sean de fácil de acceso en caso de emergencia y protejan a las zonas urbanas que, generalmente, se encuentran en las zonas bajas de la montaña (Department of Fire & Emergency Services, s/f).

Existe otro método alternativo para generar un área cortafuegos en zonas de riesgo de incendios forestales. En lugar de extraer cualquier tipo de combustible en

el cortafuegos, es posible reemplazar la vegetación densa y muy inflamable por otra vegetación de menor biomasa o menos inflamable (Senterre, 2009). Las plantas resistentes al fuego se denomina vegetación pirófila, caracterizada por su alto contenido de agua (Senterre, 2009). Por lo tanto, una planta resistente al fuego también será resistente a una sequía. Existen diversos tipos de plantas pirófilas, como ejemplo se puede mencionar *Tabebuia pallida*, caracterizada por su alto contenido de agua y baja flamabilidad (Senterre, 2009).

2. METODOLOGÍA

Una vez conocida la teoría detrás de los programas de simulación, se procede a mencionar los diferentes métodos utilizados para la obtención de los archivos de entrada necesarios y los resultados de la simulación.

Cabe recalcar que el lugar y fecha de estudio elegido son el Volcán Ilaló – Sector La Toglla ubicado en las coordenadas (-78.4, -0.26) en longitud-latitud y el día 14 de septiembre de 2015, respectivamente. El día elegido es clave para estudiar dada la susceptibilidad a los incendios entre los meses de junio a septiembre (Redacción Quito, 2015) y los daños que estos han provocado producto de la gran extensión de áreas afectadas y gases de combustión expulsados al ambiente (El Telégrafo, 2015). A continuación, se presenta la ubicación geográfica del Ilaló.

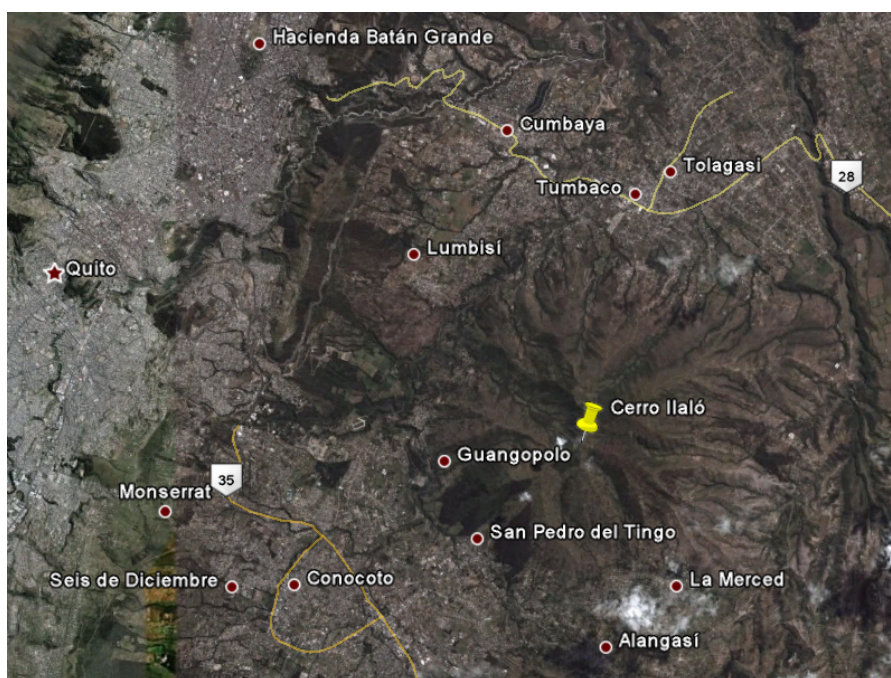


Figura 3. Ubicación Volcán Ilaló y sus alrededores (Google Earth, s/f)

Las variables de entrada necesarias se obtuvieron con la ayuda de la carrera de Ingeniería Ambiental de la Universidad San Francisco de Quito y de Paul

Dehousse, asesor del programa Proyectos de Recuperación Agro-Ambiental del Volcán Ilaló.

2.1 Simulación de la propagación del fuego en FARSITE

Para la obtención de los archivos de entrada que necesitó FARSITE, se utilizó el sistema de información geográfica QGIS, de manera que permitió visualizar, analizar y generar los datos de manera precisa y confiable.

Con el objetivo de mostrar el procedimiento de mejor manera, se lo dividirá en diferentes secciones presentando el método realizado para generar cada archivo de entrada necesario.

2.1.1 Topografía del Volcán Ilaló

Dentro de la topografía del Ilaló, fue necesario generar tres archivos de tipo ráster:

- Elevación: corresponde a las diferentes alturas del Volcán Ilaló medidas sobre el nivel del mar hasta sus distintos picos (USDA Forest Service, 2007).
- Pendiente: se refiere a la inclinación derivada de los datos de elevación del Volcán Ilaló (USDA Forest Service, 2007).
- Aspecto: se refiere a la dirección en coordenadas geográficas derivado de los datos de pendiente (QGIS Project, 2018).

Para generar estos tres archivos, se utilizó las curvas de nivel del Distrito Metropolitano de Quito con una precisión de 5 metros, ubicando el Ilaló y extrayendo los valores necesarios, obteniendo así el dominio deseado.

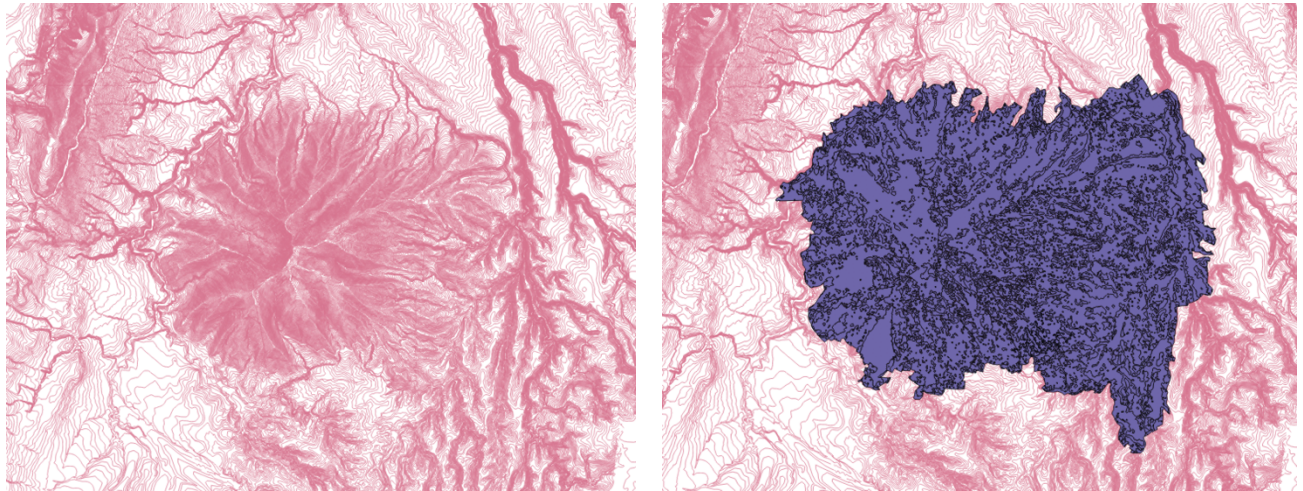


Figura 4. (a) Curvas de nivel del Volcán Ilaló y sus alrededores. (b) Intersección del dominio elegido con las curvas de nivel del Volcán Ilaló.

(a)

(b)

La intersección de las dos áreas dio como resultado un mapa topográfico del Volcán Ilaló, dentro del dominio elegido para el estudio, presentado en la figura 5.

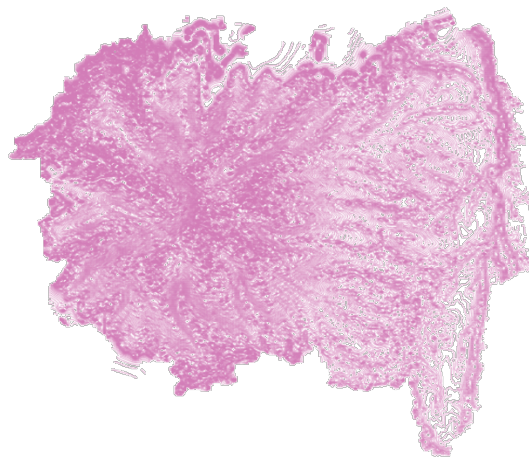


Figura 5. Mapa topográfico del Volcán Ilaló dentro del dominio elegido

A partir de la figura 5, fue posible generar los tres archivos ráster mencionados anteriormente, los cuales pudieron ser ingresados a FARSITE. En la

figura 6 se muestra un ejemplo del archivo ráster generado para guardar los datos de elevación del Ilaló.

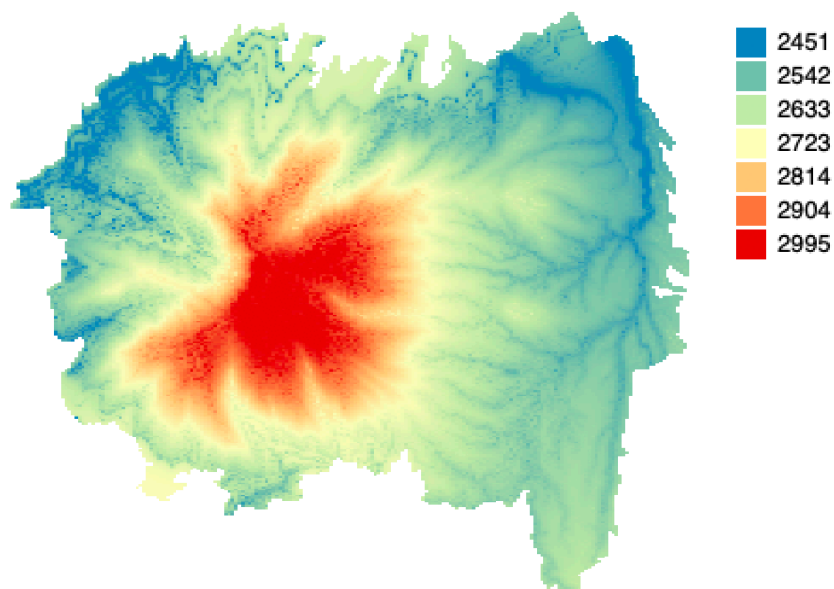


Figura 6. Archivo ráster con datos de elevación del Ilaló (m.s.n.m.)

2.1.2 Tipo de vegetación en el Volcán Ilaló

Los datos del tipo de vegetación que existe en el Cerro Ilaló fueron proporcionados por los colaboradores del proyecto. A partir de ellos se pudo distinguir la distribución de la vegetación presente dentro del dominio, considerando la ubicación geográfica del mismo (Secretaría de Ambiente, 2013). Con la información obtenida se generaron dos archivos ráster necesarios para ser variables de entrada de FARSITE.

El primer archivo corresponde a la cobertura vegetal del Ilaló, el cual se refiere al porcentaje de las áreas dentro del dominio que se encuentra cubiertas por árboles (USDA Forest Service, 2007). Para este se ubicaron los sectores del Volcán Ilaló que se encuentran cubiertos por árboles y se les asignó el número 4, que

corresponde al 100% dentro de una escala del 1-4 desde 25% a 100% (USDA Forest Service, 2007).

El segundo archivo corresponde a los combustibles presentes en el dominio. Esta información debió ser traducida al formato en el cual FARSITE puede leer los datos de vegetación correctamente, correspondiendo a los 40 modelos de combustibles asociados al comportamiento del fuego desarrollados por Scott y Burgan (Scott & Burgan, 2005). Estos 40 modelos de combustibles consisten en asignar un número entre 0 y 259 a diferentes tipos de combustibles con diferentes características entre los cuales se pueden distinguir: materiales que no se pueden quemar, combustibles de alto y bajo índice de combustión, etc. (Scott & Burgan, 2005). La asignación de estos números a la distribución de los combustibles en el Volcán Ilaló fue acompañada de la asignación de las características propias de cada modelo, de manera que la vegetación presente corresponda a un combustible en específico. Cabe recalcar que el dominio elegido para el estudio del Volcán Ilaló considera construcciones urbanas, por lo que fue importante ubicarlas correctamente y asignarles su número de combustible que, para este caso, corresponde a edificaciones que no se pueden quemar (Scott & Burgan, 2005).

En la tabla 1 se presenta un resumen del tipo de vegetación encontrada en el estudio “*Caracterización del Área de Intervención Especial y Recuperación Volcán Ilaló y Bosque Protector Flanco Oriental del Volcán Pichincha y Cinturón Verde de Quito (Bloque 8)*” y el número de modelo de combustible asignado según las características de edificación, árbol, arbusto, etc. En esta tabla, el término Canopy Cover se refiere al porcentaje de área de la montaña que se encuentra cubierta por árboles (Finney, 2004).

Tabla 1. Modelo de combustible y cobertura vegetal asociado al tipo de vegetación del Volcán Ilaló

Tipo de Vegetación	LANDFIRE Fire Behavior Fuel Model 40 NUMBER	Fuel Model Code	Canopy Cover
Arbustos húmedos	143	SH3	1
Arbustos secos	145	SH5	1
Cultivos/ cultivos ciclo corto	145	SH5	1
Infraestructura/Edificaciones-Invernaderos	91	NB1	1
Eucalipto adulto	164	TU4	4
Eucalipto joven y regeneración	164	TU4	4
Herbazales secos	145	SH5	1
Pasto Cultivado	107	GR7	1
Pasto Natural	107	GR7	1
Pinos y ciprés	164	TU4	4
Ríos	98	NB8	1
Suelos en preparación de cultivo	107	GR7	1
Suelos erosionados	145	SH5	1
Cultivos semipermanentes y permanentes	145	SH5	1

En resumen, los archivos ráster necesarios generados para construir un terreno de estudio del Ilaló en FARSITE fueron:

- Elevación
- Pendiente
- Aspecto
- Cobertura Vegetal
- Distribución y tipos de combustibles

Es importante mencionar que estos 5 archivos generados debían tener la misma extensión y el mismo tamaño de celda en QGIS para que FARSITE los pudiera leer correctamente (USDA Forest Service, 2007). Debido a esto, se eligió el

dominio presentado en la Figura 4 (b), manteniendo siempre la misma extensión y tamaño de celda en cada análisis.

2.1.3 Campo vectorial de velocidades del viento

Con los datos del campo vectorial del viento proporcionado por los colaboradores de este proyecto, se logró realizar un análisis exhaustivo sobre el vector resultante y dirección del viento dentro del dominio elegido, con el fin de visualizar los datos obtenidos y facilitar la interpretación de los resultados futuros. Ahora bien, los datos proporcionados se encontraban situados, geográficamente, en celdas de 1 km² de acuerdo con el rango de longitud y latitud dentro del cual se encuentra el Volcán Ilaló.

Por cada celda de este tamaño, para cada hora del día 14 de septiembre de 2015, se tenían las magnitudes de dos vectores en dirección u y v , correspondiendo a x y y en el plano, respectivamente. Se procedió a hallar el módulo y la dirección de los vectores resultantes para todas las celdas en una malla de 120x120 para introducirlos en QGIS de manera que se pueda visualizar el comportamiento del viento en el Ilaló y sus alrededores. Este procedimiento se lo realizó para todas las horas del día 14 de septiembre del 2015, obteniendo 24 campos vectoriales distintos. Estos campos vectoriales se sobrepusieron encima del dominio elegido para el estudio dando como resultado el ejemplo presentado en la Figura 7, una visualización de la dirección del viento dentro del dominio en una hora específica.

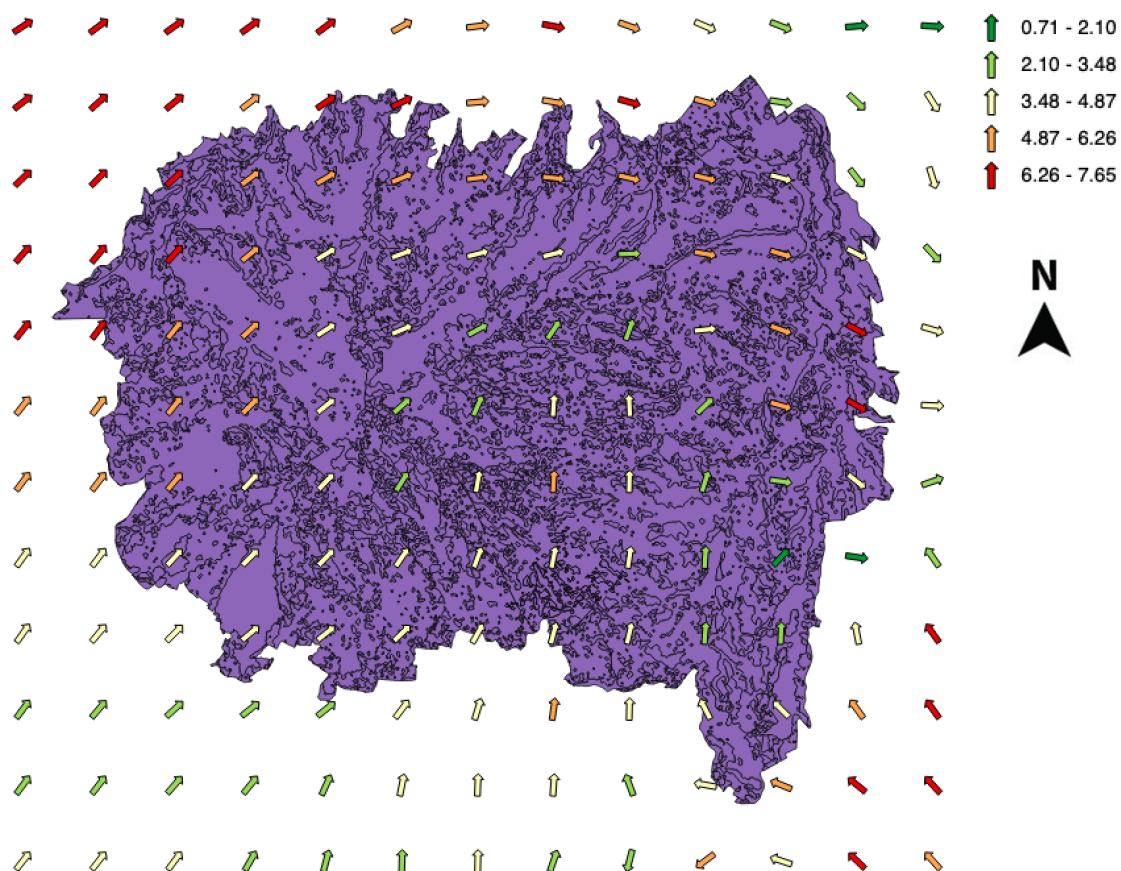


Figura 7. Velocidad [km/h] y dirección del viento en el Volcán Ilaló a las 8:00 AM del 14 de septiembre de 2015

Los valores de velocidad del viento [km/h] y dirección, en grados, para cada hora del día 14 de septiembre, fueron organizados en un archivo de texto e introducidos en FARSITE como variable de entrada para la simulación.

2.1.4 Condiciones meteorológicas del 14 de septiembre de 2015

Los datos de las variables meteorológicas presentes en el día del estudio se consiguieron a través de la Secretaría del Ambiente, la cual registró los datos necesarios para el análisis. Con el objetivo de que la simulación se realice con más variables, se registraron condiciones meteorológicas un día antes y un día después

de la fecha de estudio (USDA Forest Service, 2018). Para esto, en el archivo de texto de condiciones meteorológicas del 13, 14 y 15 de septiembre de 2015 para FARSITE se requería registrar (USDA Forest Service, 2018):

- Precipitación
- Temperatura ambiente mínima y máxima en el día
- Humedad mínima y máxima en el día
- Horas del día de los datos registrados

En la tabla 2 se muestra la recopilación de los datos mencionados anteriormente (Secretaría de Ambiente, 2018).

Tabla 2. Condiciones meteorológicas del 13, 14 y 15 de septiembre de 2015 en el Volcán Ilaló

Fecha	13/09/2015
Precipitación [mm]	0
Hora Temperatura Mínima	5:00
Hora Temperatura Máxima	13:00
Temperatura mínima [°C]	10
Temperatura máxima [°C]	25
Humedad mínima [%]	12
Humedad máxima [%]	55
Fecha	14/09/2015
Precipitación [mm]	0
Hora Temperatura Mínima	6:00
Hora Temperatura Máxima	12:00
Temperatura mínima [°C]	11
Temperatura máxima [°C]	25
Humedad mínima [%]	8
Humedad máxima [%]	38
Fecha	15/09/2015
Precipitación [mm]	0
Hora Temperatura Mínima	6:00
Hora Temperatura Máxima	14:00
Temperatura mínima [°C]	9
Temperatura máxima [°C]	26
Humedad mínima [%]	17
Humedad máxima [%]	57

2.1.5 Punto de ignición y duración de la simulación

El punto de ignición corresponde al lugar en el cual se inició el incendio y desde el cual se propagó (USDA Forest Service, 2007). Para localizar dicho punto, se acudió a los datos históricos registrados. Tras la búsqueda se determinó que el 14 de septiembre de 2015 se identificó un incendio forestal en el Volcán Ilaló – Sector La Toglla, es decir, en el lugar de estudio elegido en este proyecto (Beltrán, 2015). Por lo tanto, la localización del punto de ignición en FARSITE se posiciona en las coordenadas geográficas que hacen referencia a La Toglla.

De igual manera, la duración de la simulación se determinó de acuerdo con datos históricos. En el incendio forestal registrado en La Toglla, menciona que la alerta fue notificada al Cuerpo de Bomberos de Quito aproximadamente a las 6:00 AM y, hasta las 2:00 PM, los bomberos se encontraban controlando el incendio (Beltrán, 2015). Por lo tanto, se calculan 9 horas de duración del incendio, que a su vez corresponde a la duración de la simulación en FARSITE.

2.2 Simulación del modelo de dispersión de gases en COMSOL

2.2.1 Geometría del Volcán Ilaló

En primer lugar, para obtener el dominio elegido para la simulación, se modeló la geometría del Volcán Ilaló en tres dimensiones, utilizando el mapa topográfico presentado en la figura 4. Para el modelo, se utilizó el programa de diseño en 3D SketchUp. Las curvas de nivel generadas a partir de la figura 5 mediante QGIS y Autocad, permitieron la extrusión de la topografía del Volcán Ilaló. El resultado de este proceso se presenta en la figura 8.

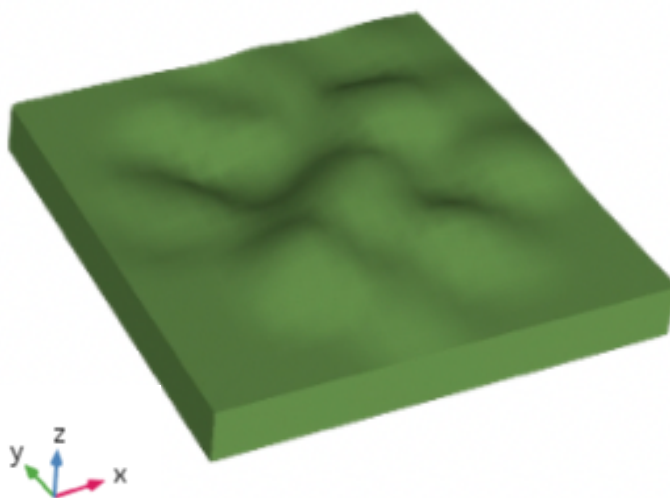


Figura 8. Modelado tridimensional del Volcán Ilaló

El modelo presentado en la figura 8 considera un dominio cuadrado de 7x7 km en el cual se muestra la elevación de la montaña. El estudio se debe realizar en la parte superior de la montaña, ya que es en este volumen donde el viento se encuentra fluyendo. Por lo tanto, a partir de la figura 8, se modeló el volumen que ocupa el aire en la parte superior del Volcán Ilaló, de manera que sea posible analizar el transporte de las especies en este dominio. En la figura 9 se muestra el resultado del volumen ocupado por el aire en la parte superior de la montaña.

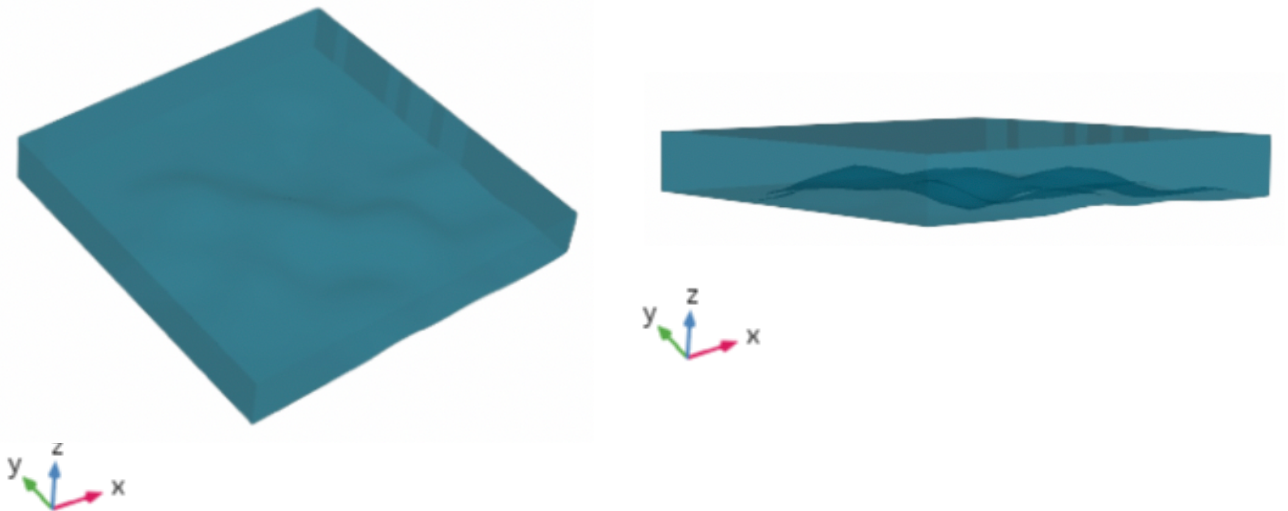


Figura 9. Volumen de aire en la parte superior del Volcán Ilaló (dominio de estudio)

El modelo presentado en la figura 9 se importó hacia COMSOL. Adicionalmente, se le asignó las propiedades del aire a la presión y temperatura registradas en las condiciones meteorológicas del día 14 de septiembre de 2015.

Ahora bien, una vez obtenida la geometría necesaria para realizar la simulación, se procedió a dividirla en dos estudios. El primer estudio correspondió en hallar las soluciones de la velocidad del fluido para cada hora. Por otro lado, el

segundo estudio se centró en hallar la solución del transporte de la especie para cada hora. El tiempo de simulación, al igual que en FARSITE, fue de 9 horas para ambos estudios.

2.2.2 Primer estudio: soluciones de velocidad del fluido

Las magnitudes de velocidades del viento cambian para cada hora del día, pero durante el transcurso de cada hora se mantienen constantes. Por esta razón, al realizar los estudios para cada hora, estos se analizaron en estado estacionario para hallar su solución.

Como se mencionó anteriormente, el campo vectorial del viento para el 14 de septiembre de 2015 presentó magnitudes bidimensionales de velocidad en las direcciones u y v para cada celda de 1 km^2 dentro del dominio elegido. Debido a que los estudios se realizan para cada hora del día, se decidió determinar el campo vectorial del viento en cada hora como una fórmula que pueda ser ingresada en COMSOL y sea capaz de calcular las velocidades en las direcciones x y y , para cada espacio del dominio. Para lograr obtener esta fórmula, se realizó una regresión polinomial múltiple ingresando como variables los ejes x y y donde se encuentra el dominio presentado en la figura 9 y las magnitudes de velocidades en u y v .

La regresión polinomial múltiple es una herramienta matemática que permite determinar una tendencia, representada por una ecuación, relacionando tres variables diferentes al mismo tiempo (McDonald, 2009). En este caso, se relacionan dos variables espaciales junto con una variable de velocidad, con el objetivo de obtener una ecuación que permita determinar la velocidad en función de las variables espaciales.

Para realizar este procedimiento se utilizó MATLAB, donde se creó un plano xy con una extensión de $12 \times 12 \text{ km}$, representado en dominio extendido al

presentado en la figura 7 y en el eje z se ubicaron las velocidades en u y en v , respectivamente. Para este cálculo se eligió un dominio extendido de 12x12 km con el fin de tener más datos para analizar y, por ende, una mejor regresión. Se obtuvieron dos resultados de velocidades, uno en la dirección x y otro en la dirección y , para cada hora el día.

Como ejemplo, las figuras 10 y 11 muestran los resultados de la regresión polinomial múltiple del campo de velocidades a las 6 de la mañana del 14 de septiembre de 2015.

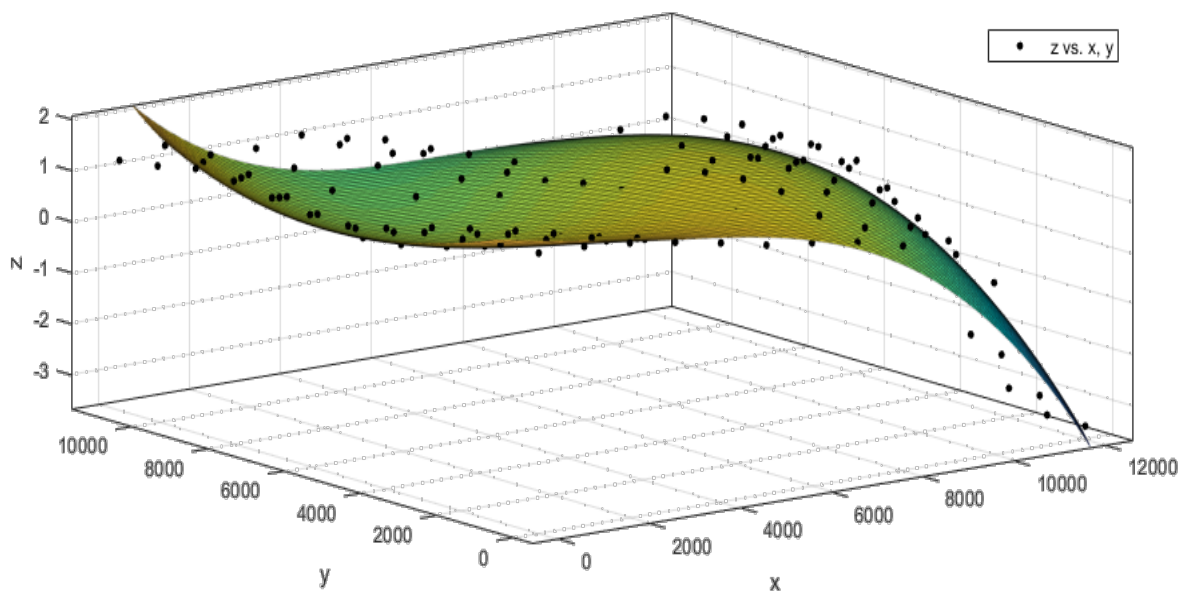


Figura 10. Velocidad del viento en la dirección x (eje z) [m/s] vs. Dominio extendido del Volcán Ilaló (plano xy) [m]

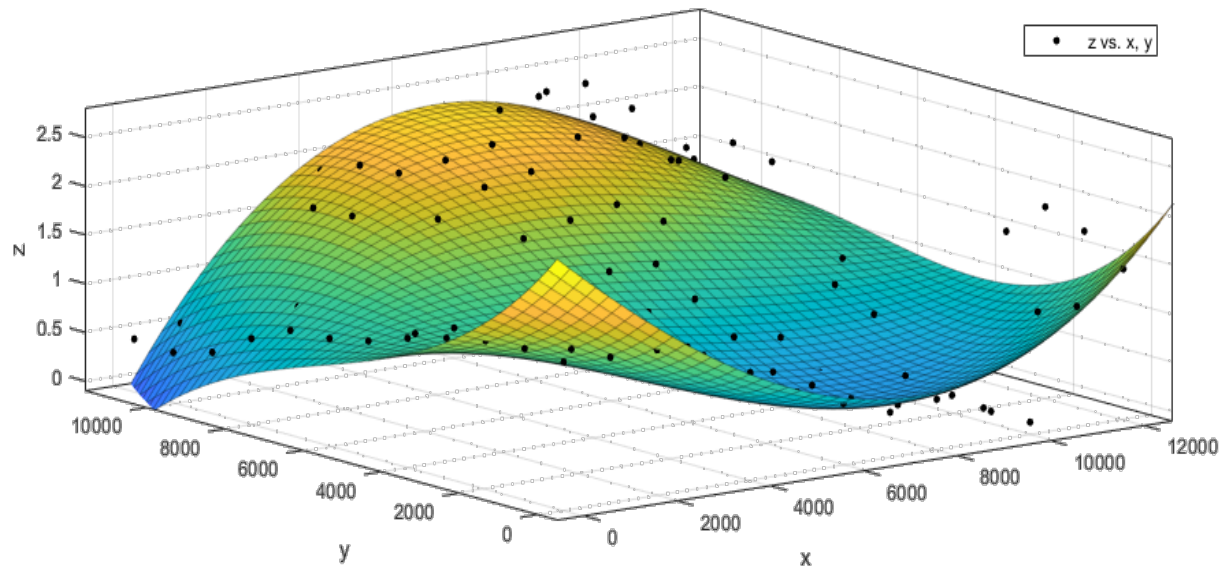


Figura 11. Velocidad del viento en la dirección y (eje z) [m/s] vs. Dominio extendido del Volcán Ilaló (plano xy) [m]

En las figuras 10 y 11, los puntos negros representan los datos reales de velocidades del viento en las direcciones x y y respectivamente, y las superficies corresponden a las gráficas de las ecuaciones obtenidas a través de la regresión.

La regresión polinomial múltiple de las tres variables resultó en una fórmula general, para todas las horas, de la forma presentada en la ecuación (13).

$$V(x, y) = p_{00} + p_{10}x + p_{01}y + p_{20}x^2 + p_{11}xy + p_{02}y^2 + p_{30}x^3 + p_{21}x^2y + p_{12}xy^2 + p_{03}y^3 \quad (13)$$

En la tabla 3 se muestran los valores de los coeficientes generales de la ecuación (13), para cada hora del intervalo de estudio en las direcciones x y y.

Tabla 3. Valores de coeficientes de regresión para cada hora del intervalo de estudio

Velocidad en la dirección X V(x)									
Coef.	6:00 - 7:00	7:00 - 8:00	8:00 - 9:00	9:00 - 10:00	10:00 - 11:00	11:00 - 12:00	12:00 - 13:00	13:00 - 14:00	14:00 - 15:00
p00	2.032	1.598	0.234	-0.0623	-0.6048	0.5773	-2.396	-0.4296	-0.6502
p10	-2.34E-04	-2.44E-04	1.59E-04	3.13E-04	4.25E-04	8.20E-04	4.45E-04	-8.19E-04	-6.01E-04
p01	-3.10E-04	-7.50E-05	4.59E-04	2.87E-04	3.37E-04	-7.29E-05	-3.29E-04	-2.78E-04	-5.78E-04
p20	5.49E-08	8.47E-09	-2.50E-08	-7.24E-08	-5.67E-08	8.16E-08	-1.08E-07	5.00E-08	3.71E-08
p11	2.30E-08	4.06E-08	-2.79E-08	-7.47E-08	-8.03E-08	5.40E-08	-3.60E-09	9.67E-08	7.56E-08
p02	1.65E-08	-6.51E-09	-7.19E-08	-6.85E-08	-1.22E-07	-1.05E-07	3.14E-08	-1.88E-08	5.14E-08
p30	-6.22E-12	-2.35E-13	1.46E-12	4.79E-12	-7.53E-13	-3.91E-12	5.49E-12	6.24E-13	-2.12E-13
p21	7.58E-12	-6.29E-13	-4.01E-13	2.97E-12	9.28E-12	-2.62E-12	1.56E-12	-6.42E-12	-3.27E-12
p12	-8.39E-12	-2.38E-12	7.81E-13	2.91E-12	1.39E-12	3.46E-12	-6.34E-13	-2.54E-13	-1.61E-12
p03	1.40E-12	8.17E-13	3.70E-12	4.09E-12	8.04E-12	7.96E-12	-2.52E-13	2.08E-12	-1.39E-12
Velocidad en la dirección Y V(y)									
Coef.	6:00 - 7:00	7:00 - 8:00	8:00 - 9:00	9:00 - 10:00	10:00 - 11:00	11:00 - 12:00	12:00 - 13:00	13:00 - 14:00	14:00 - 15:00
p00	2.049	1.497	0.974	0.5593	-0.1315	-0.2475	0.4606	0.01764	1.125
p10	-3.75E-04	-3.06E-04	-1.18E-04	-1.59E-04	2.21E-04	3.61E-04	-8.07E-05	1.89E-04	1.37E-05
p01	-4.53E-04	-2.46E-04	-2.56E-04	-4.65E-04	-1.37E-04	7.37E-05	-7.90E-05	8.74E-05	-3.17E-04
p20	1.14E-08	3.23E-09	-1.22E-08	3.38E-08	-4.87E-08	-1.51E-08	3.27E-08	7.31E-09	-1.79E-09
p11	8.77E-08	6.66E-08	5.64E-08	-9.84E-10	2.78E-08	-4.47E-08	-3.23E-09	2.61E-08	6.21E-08
p02	6.77E-08	5.55E-08	5.02E-08	1.31E-07	3.83E-08	1.51E-08	2.76E-08	-2.53E-08	2.62E-08
p30	1.33E-12	1.47E-12	2.93E-13	-2.19E-12	3.25E-12	-1.42E-14	-1.50E-12	-1.09E-12	1.24E-13
p21	-7.42E-12	-6.98E-12	2.40E-13	8.06E-13	9.74E-14	2.81E-12	-2.14E-13	-1.11E-12	-1.96E-12
p12	1.48E-12	3.03E-12	-4.30E-12	-5.67E-13	-5.46E-12	-1.85E-12	-2.48E-13	-2.76E-12	-4.64E-12
p03	-4.06E-12	-4.26E-12	-1.87E-12	-7.82E-12	-4.83E-13	-6.00E-13	-9.63E-13	2.58E-12	6.12E-13

Una vez obtenidas las ecuaciones que modelan el comportamiento del viento en el dominio presentado en la figura 9, se procedió a determinar si el flujo era turbulento o laminar. El número de Reynolds determina el comportamiento del fluido (Munson, 2014), por lo tanto, se determinó su valor para un punto dentro del dominio.

Observando la ecuación (8), se puede notar que el parámetro D corresponde a la longitud característica de la geometría que se está analizando. Para un terreno

de geometría completa como lo es una montaña, la longitud característica para el cálculo del número de Reynolds es la altura de la montaña medida desde la superficie (Kilpatrick et al., 2016). Bajo este criterio, utilizando la ecuación (8) con las propiedades del fluido a la temperatura ambiente del día 14 de septiembre de 2015, se obtuvo un número de Reynolds de $2.03e7$, cumpliendo con las características de un flujo turbulento, según la ecuación (7).

Como se mencionó anteriormente, el estudio de flujo se realizó con el modelo de flujo turbulento $k-\varepsilon$, debido a su buen desempeño en gradientes de presiones bajos y consideraciones de convección y difusión (Bardina et al., 1997).

Adicionalmente, se aplicó la fórmula de potencia presentada en la ecuación (9), de manera que se puedan obtener las velocidades en diferentes puntos de altura dentro del dominio. Se toma como altura referencial 10 [m], debido a que las medidas experimentales proporcionadas fueron tomadas a esta distancia desde la superficie del Volcán Ilaló. A partir de este dato se obtienen las ecuaciones (14) y (15) para las velocidades en las direcciones x y y , respectivamente, a diferentes alturas.

$$V(x_z) = V(x) * \left(\frac{z}{10}\right)^{0.2} \quad (14)$$

$$V(y_z) = V(y) * \left(\frac{z}{10}\right)^{0.2} \quad (15)$$

En las ecuaciones (14) y (15):

$V(x_z)$ es la velocidad en la dirección x a diferentes alturas z , en [m/s].

$V(y_z)$ es la velocidad en la dirección y a diferentes alturas z , en [m/s].

$V(x)$ y $V(y)$ se obtienen de la ecuación (13) reemplazando los coeficientes de la tabla 3, en [m/s].

z es el conjunto de las diferentes alturas del dominio de la figura 9, en [m].

2.2.3 Segundo estudio: solución del transporte de la especie

En esta segunda etapa de la simulación en COMSOL, fue importante definir el tipo de especie que se estudió, en concordancia con los resultados disponibles para validar el modelo. Adicionalmente, para obtener el valor del flujo molar por unidad de área de la especie necesario en la ecuación (10) para resolver el estudio, se utilizaron los resultados obtenidos de la primera simulación en FARSITE, presentados en la sección RESULTADOS Y DISCUSIÓN en las tablas 4 y 6.

El gas de combustión que se analizó principalmente fue el monóxido de carbono, es decir, el transporte de este gas cuando interacciona con el fluido.

Por otro lado, para asignar el flujo molar por metro cuadrado de monóxido de carbono para cada hora del incendio forestal, se dibujó un área equivalente, a los datos de la tabla 4, en el volumen de control de la figura 9. Esta área aumentó conforme aumentaron las horas del día. En las figuras 12 y 13 se muestran ejemplos de las áreas dibujadas para las 6 y 7 de la mañana, respectivamente.

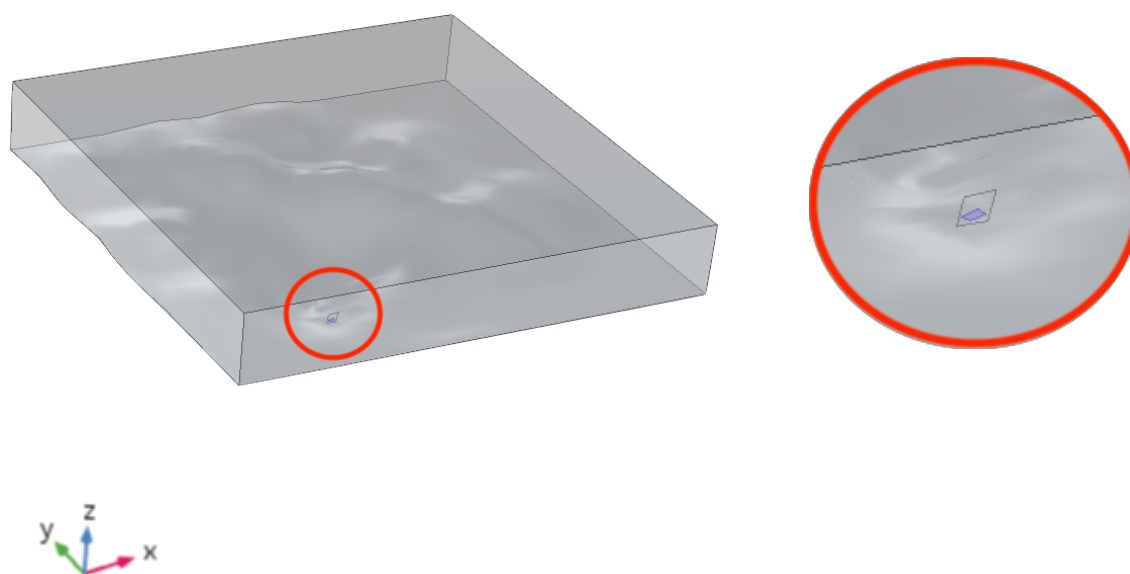


Figura 12. Área afectada a las 6 AM dibujada en el dominio

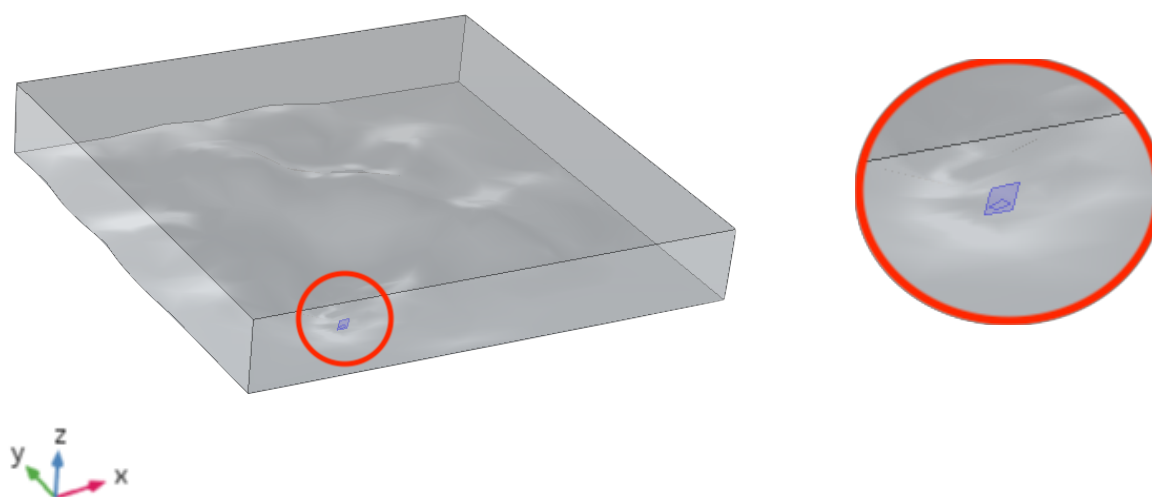


Figura 13. Área afectada a las 7 AM dibujada en el dominio

A las áreas afectadas por el incendio, representadas por los rectángulos dibujados en la superficie del dominio en las figuras 12 y 13, se les asignó el flujo molar por metro cuadrado representando el ingreso del monóxido de carbono, producido por la combustión en el incendio forestal, al volumen de aire.

Es necesario observar el transporte del monóxido de carbono a lo largo de todas las horas del día, con el objetivo de monitorear su comportamiento con la interacción del viento en cada hora. Por lo tanto, la solución para el transporte de la especie se obtuvo a través de un estudio dependiente con el tiempo, a diferencia de la solución de velocidad del fluido.

Adicionalmente, para los dos estudios que se mencionaron anteriormente, se asignó un mallado tipo “normal” en COMSOL presentado en la figura 14. Este tipo de mallado se eligió tomando en cuenta la confiabilidad de los resultados y el tiempo de duración real que tarda la computadora en simular los dos fenómenos.

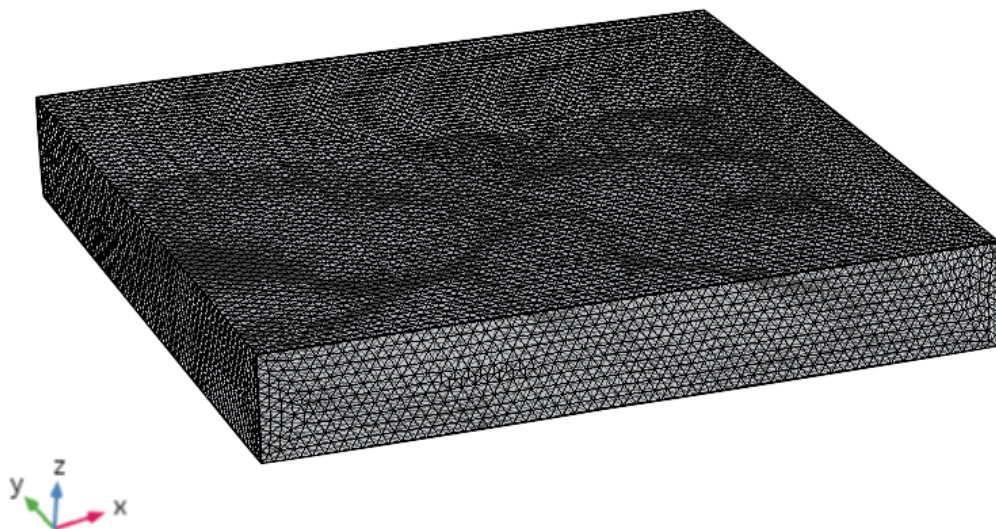


Figura 14. Mallado utilizado por la simulación en COMSOL

Finalmente, se debe tener en cuenta que, con el objetivo de unir los estudios realizados consecutivamente, se debe configurar como valores iniciales los estudios previos a la hora que se está analizando, de manera que los resultados obtenidos tomen en cuenta los valores calculados para todas las horas del día.

2.3 Método de contención de la propagación del incendio forestal

Antes del desarrollo de esta metodología, fue necesario validar la simulación de FARSITE. Estos resultados comparativos se encuentran en la sección “Resultados y Discusión”.

Ahora bien, una vez validada la simulación, se procedió a estudiar métodos de contener y frenar la propagación del incendio forestal, tomando las condiciones del día 14 de septiembre de 2015, en el sector La Toglla – Volcán Ilaló. Para ello, se colocaron cortafuegos en lugares cercanos al punto de ignición (La Toglla), con el objetivo de observar el comportamiento del incendio bajo estas condiciones. Se eligió que los cortafuegos sean compuestos por plantas resistentes al fuego. Bajo este supuesto, se procedió a construir los cortafuegos en QGIS según la ubicación geográfica de cada tipo de vegetación descrito en el estudio *“Caracterización del Área de Intervención Especial y Recuperación Volcán Ilaló y Bosque Protector Flanco Oriental del Volcán Pichincha y Cinturón Verde de Quito (Bloque 8)”*. Tomando en cuenta la trayectoria del fuego cuando se observan los resultados de área afectada por el fuego presentados en la figura 16 y considerando que se va a mantener el mismo punto de ignición para estudiar los métodos de contención, se construyeron cortafuegos que permiten frenar o disminuir la propagación del incendio de dos maneras:

1. Colocando una barrera cortafuegos alejada del punto de ignición
2. Colocando dos barreras cortafuegos de manera que el punto de ignición se ubicó entre las dos barreras

Los combustibles encontrados en las coordenadas geográficas descritas anteriormente fueron reemplazados por un combustible tipo NB (non-burnable), correspondiente a material que no se puede quemar. Estos cambios del tipo de vegetación en el archivo ráster “Distribución y tipos de combustibles” fueron actualizados e ingresados a FARSITE para simular el incendio forestal bajo condiciones diferentes.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1 Propagación del fuego en FARSITE

3.1.1 Resultados de la simulación en FARSITE

En la presente sección se muestran los resultados obtenidos a través de FARSITE.

En primer lugar, en la Figura 15 se muestra el resultado de la distribución de vegetación existente en el Volcán Ilaló al introducir el archivo ráster, de manera que se pueda visualizar la densidad de cada tipo de vegetación en cada sector.

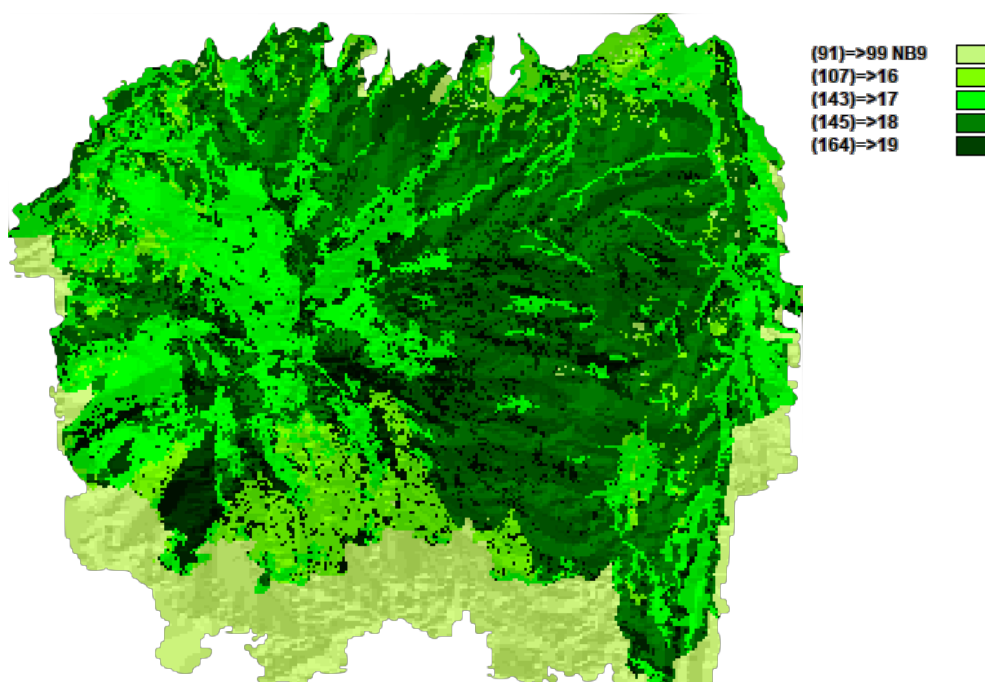


Figura 15. Distribución de los diferentes tipos de vegetación en el Volcán Ilaló

En la figura 15 se puede observar la distribución de los tipos de combustibles (archivo ráster necesario) presentes en el Volcán Ilaló, según el estudio de

caracterización presentado en “*Caracterización del Área de Intervención Especial y Recuperación Volcán Ilaló y Bosque Protector Flanco Oriental del Volcán Pichincha y Cinturón Verde de Quito (Bloque 8)*” en FARSITE. A partir de esta representación gráfica y los datos presentados en la tabla 1, se puede observar que los combustibles que no se pueden quemar, cuyo número asignado se encuentra en el rango de 91 hasta 99 (NB1 – NB9), se encuentran ubicados en las faldas del Ilaló. Este resultado es lógico debido a que, comparando las coordenadas geográficas de estos lugares con Google Earth, se observó que se trataba del sector “El Tingo”, zona urbana perteneciente a la parroquia de Alangasí (Ministerio de Turismo, s/f). Los otros tipos de combustibles, referenciados en esta distribución, consisten en los árboles, arbustos y cultivos descritos en la tabla 1, ubicados en las elevaciones del Ilaló. Observando la figura 3 se puede visualizar la vegetación presente en los lugares especificados en la figura 15.

Por otro lado, en la leyenda de la figura 15 se observa la distribución del combustible número 164, denominado como árboles según la tabla 1. Esta distribución corresponde a la cobertura vegetal, uno de los cinco archivos ráster necesarios, que proporciona información sobre el porcentaje de las áreas dentro del dominio que se encuentra cubiertas por árboles (USDA Forest Service, 2007).

Ahora bien, una vez localizado el punto de ignición en las coordenadas geográficas que especifican el Sector La Toglla y configurando FARSITE para el tiempo de duración del incendio especificado anteriormente, se obtuvieron diferentes resultados que permitieron visualizar y analizar la propagación del incendio y los gases de combustión liberados hacia la atmósfera.

En la figura 16 se puede visualizar un mapa de distribución y tipos de combustibles del Ilaló, el cual sirve de guía para evaluar el área afectada por el incendio, representada por la zona roja dentro de esta figura. Se observa que el área afectada por el incendio forestal no es homogénea, esto se debe a que la elevación y la distribución de combustibles no cumplen un patrón definido, como se observa en las figuras 6 y 15, respectivamente. Por lo tanto, al momento que el fuego se está expandiendo, se encuentra con diferentes combustibles con diferentes propiedades, además de elevaciones distintas del terreno, lo cual provoca un mayor o menos aumento de la propagación, así como diferentes direcciones de los polígonos de expansión (Finney, 1998).

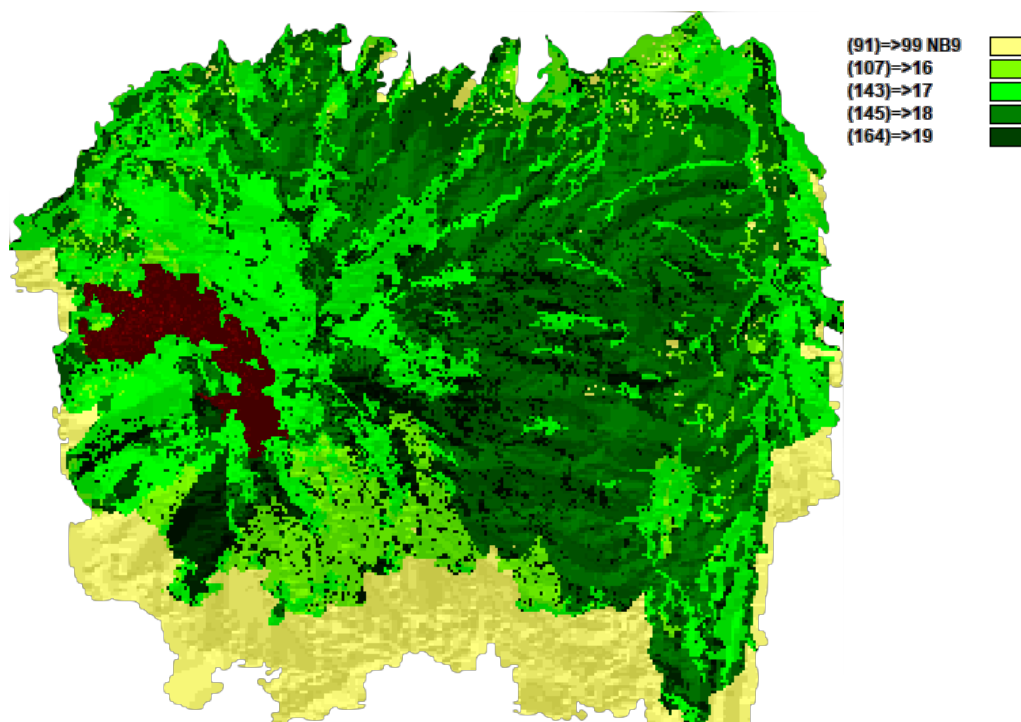


Figura 16. Área afectada por el incendio (zona roja) representada en un mapa de distribución y tipos de combustibles del Ilaló, mostrando una propagación no homogénea por los distintos combustibles presentes

Adicionalmente, en la tabla 4 se presentan los datos de área afectada por el incendio en relación con cada hora del día, registrados en cada paso de tiempo que se eligió para la simulación, correspondiente a 30 minutos. Se puede observar que el área afectada incrementa conforme la hora del día aumenta, como era de esperarse debido a que si el fuego no se ha extinguido y continúa interactuando con el viento, este se seguirá propagando y, por lo tanto, aumentando su área de afectación en el terreno (Fernandez-Pello, 2017). Una vez que el incendio forestal se extinguió, el área total de afectación en el Volcán Ilaló, obtenida a través de FARSITE, fue de 211.7 hectáreas.

Tabla 4. Área afectada por el incendio [ha] en cada hora del día 14 de septiembre de 2015

Intervalo de horas [h]	Hora del día [h]	Área afectada por el incendio [ha]
0:00	6:00	0
0:30	6:30	0.211
1:00	7:00	0.448
1:30	7:30	2.736
2:00	8:00	3.437
2:30	8:30	4.441
3:00	9:00	5.675
3:30	9:30	6.418
4:00	10:00	7.779
4:30	10:30	15.51
5:00	11:00	40.223
5:30	11:30	57.209
6:00	12:00	71.846
6:30	12:30	92.081
7:00	13:00	122.486
7:30	13:30	144.654
8:00	14:00	159.635
8:30	14:30	179.524
9:00	15:00	211.726

En las figuras 17, 18 y 19, se presentan gráficos que describen la tendencia de generación de tres productos diferentes de la combustión: $PM_{2.5}$, CO y CO_2 . En los tres gráficos se observa que, en las primeras horas de duración del incendio, su producción es baja hasta que se incrementa y fluctúa hasta el punto final. Este comportamiento se puede explicar por medio de la distribución no homogénea de combustibles, las diferentes inclinaciones del terreno y el campo vectorial del viento. En la fase de inicio, la combustión es desacelerada debido a que el incendio recién empieza a interactuar con el viento y no lo propaga de manera significativa. En la siguiente etapa, conforme el fuego interactúa con el viento, el incendio se expande y alcanza diferentes inclinaciones del terreno. Estas, al tener pendientes altas y bajas, el incendio se propagará con más o menos velocidad, respectivamente (Fernandez-Pello, 2017). Adicionalmente, los diferentes índices de combustión de cada combustible presente en el terreno también generan estas fluctuaciones de combustión de gases y material particulado.

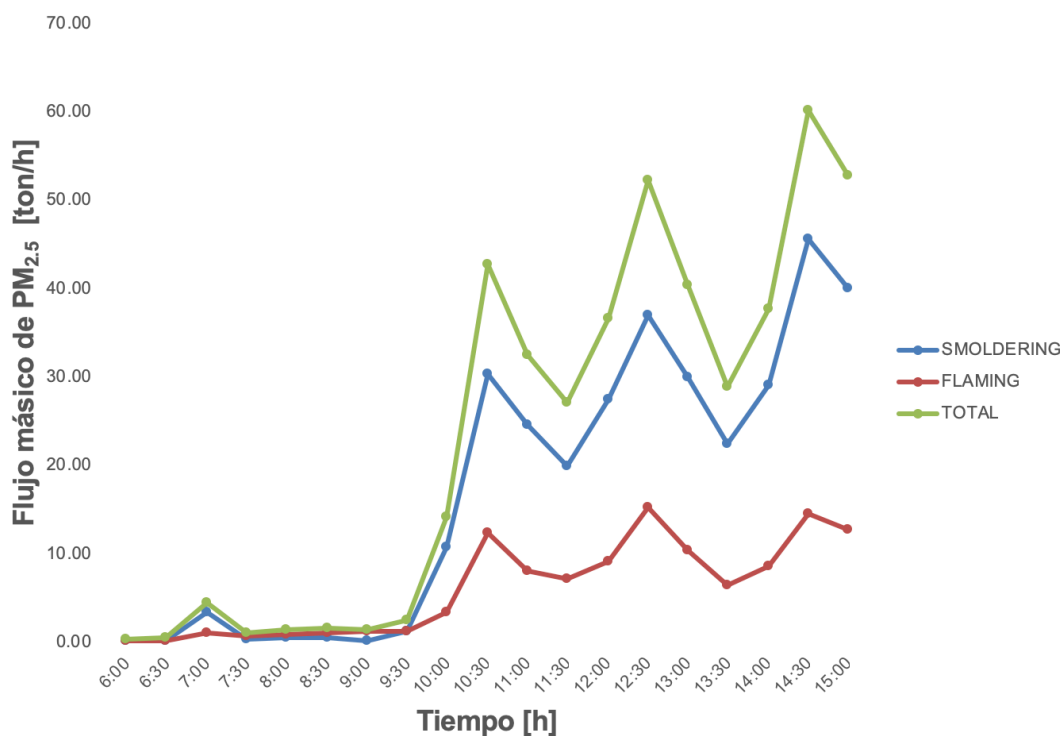


Figura 17. Tasa de emisión de $PM_{2.5}$ [ton/h] vs. Hora del día [h]

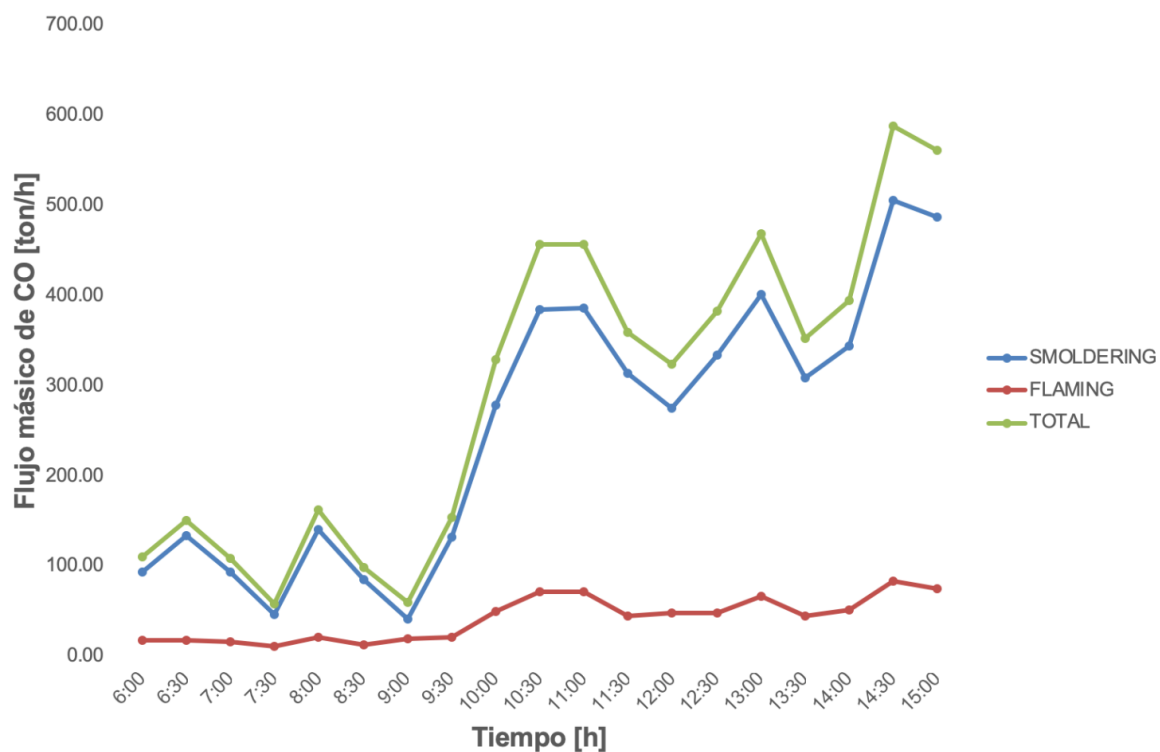


Figura 18. Tasa de emisión de CO [ton/h] vs. Hora del día [h]

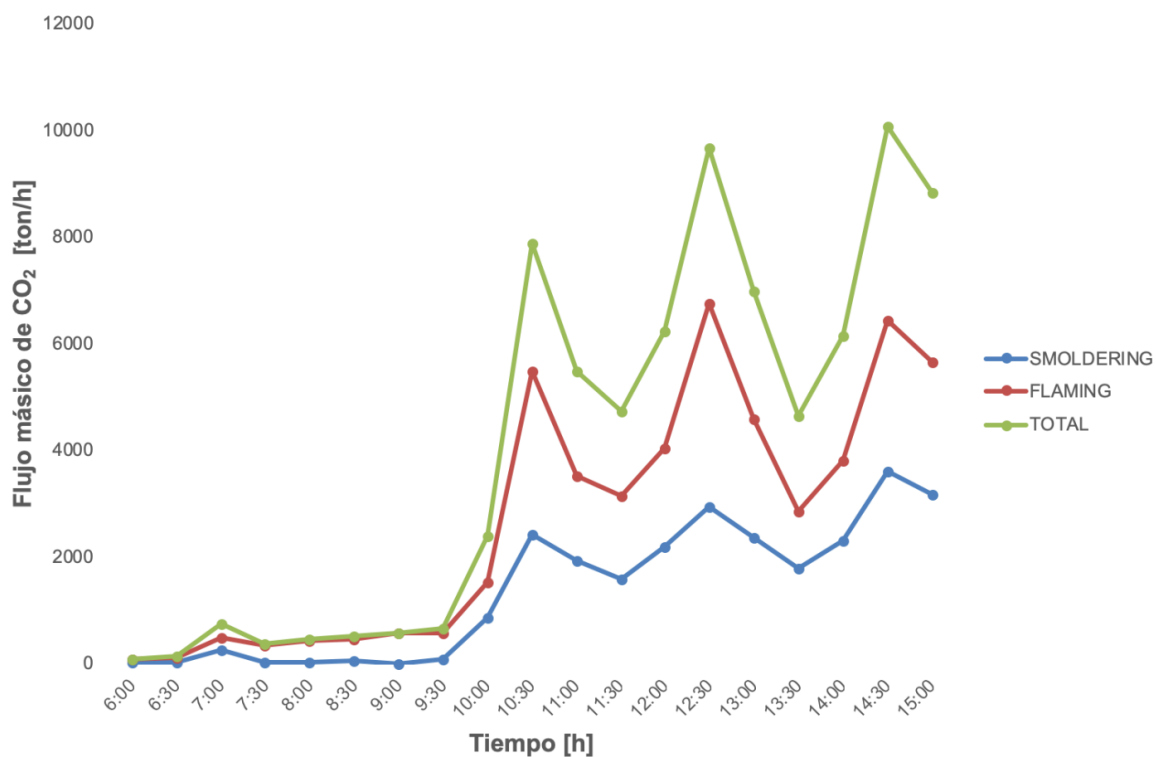


Figura 19. Tasa de emisión de CO₂ [ton/h] vs. Hora del día [h]

La tabla 5, muestra los datos de flujo másico de $PM_{2.5}$ obtenidos para las dos fases de combustión y su sumatoria total para cada hora del día, incluyendo el paso de tiempo elegido de 30 minutos. En esta tabla, que describe la misma tendencia analizada anteriormente para la figura 17, muestra que, según la simulación realizada en FARSITE, en el incendio forestal reportado en el Sector La Toglla – Volcán Ilaló el día 14 de septiembre de 2015 se produjeron 439 toneladas de $PM_{2.5}$.

Tabla 5. Flujo másico de $PM_{2.5}$ para cada hora de duración del incendio del 14 de septiembre de 2015 en La Toglla

Intervalo de horas [h]	Hora del día [h]	Smoldering [ton/h]	Flaming [ton/h]	Flujo másico total [ton/h]
0:00	6:00	0.24	0.18	0.42
0:30	6:30	0.23	0.25	0.49
1:00	7:00	3.33	1.11	4.44
1:30	7:30	0.38	0.76	1.15
2:00	8:00	0.53	0.96	1.49
2:30	8:30	0.61	1.07	1.67
3:00	9:00	0.12	1.27	1.39
3:30	9:30	1.16	1.27	2.44
4:00	10:00	10.76	3.46	14.22
4:30	10:30	30.42	12.38	42.81
5:00	11:00	24.52	7.98	32.50
5:30	11:30	19.99	7.15	27.13
6:00	12:00	27.50	9.14	36.63
6:30	12:30	36.92	15.26	52.18
7:00	13:00	29.91	10.40	40.31
7:30	13:30	22.47	6.45	28.92
8:00	14:00	29.13	8.65	37.78
8:30	14:30	45.52	14.60	60.12
9:00	15:00	39.96	12.78	52.74
TOTAL		323.71	115.12	438.82

Adicionalmente, las tablas 6 y 7 muestran los resultados del flujo másico de CO y CO₂, presentados bajo el mismo formato descrito para la tabla 5. En este

caso, según la simulación realizada en FARSITE, en el incendio forestal reportado en el Sector La Toglla – Volcán Ilaló el día 14 de septiembre de 2015 se produjeron 5580 toneladas de CO y 76600 de CO₂.

Tabla 6. Flujo másico de CO para cada hora de duración del incendio del 14 de septiembre de 2015 en La Toglla

Intervalo de horas [h]	Hora del día [h]	Smoldering [ton/h]	Flaming [ton/h]	Flujo másico total [ton/h]
0:00	6:00	92.93	17.38	110.31
0:30	6:30	133.80	17.22	151.02
1:00	7:00	93.00	16.67	109.67
1:30	7:30	46.61	12.03	58.64
2:00	8:00	140.67	22.05	162.72
2:30	8:30	85.65	12.38	98.03
3:00	9:00	41.53	19.14	60.67
3:30	9:30	133.10	21.38	154.48
4:00	10:00	278.67	50.28	328.95
4:30	10:30	384.98	72.03	457.01
5:00	11:00	385.90	71.22	457.12
5:30	11:30	314.74	44.99	359.73
6:00	12:00	274.92	49.03	323.95
6:30	12:30	333.96	48.91	382.87
7:00	13:00	402.37	66.46	468.83
7:30	13:30	308.33	44.82	353.15
8:00	14:00	343.99	51.25	395.24
8:30	14:30	505.97	82.78	588.75
9:00	15:00	486.93	74.49	561.42
TOTAL		4788.05	794.51	5582.56

Tabla 7. Flujo másico de CO₂ para cada hora de duración del incendio del 14 de septiembre de 2015 en La Toglla

Intervalo de horas [h]	Hora del día [h]	Smoldering [ton/h]	Flaming [ton/h]	Flujo másico total [ton/h]
0:00	6:00	19.26	77.46	96.73
0:30	6:30	18.44	111.79	130.23
1:00	7:00	264.60	488.53	753.12
1:30	7:30	30.35	337.68	368.03
2:00	8:00	42.27	422.34	464.60
2:30	8:30	48.43	470.74	519.17
3:00	9:00	9.60	563.05	572.64
3:30	9:30	92.52	563.31	655.83
4:00	10:00	854.78	1531.30	2386.00
4:30	10:30	2417.60	5472.50	7890.20
5:00	11:00	1948.40	3528.20	5476.70
5:30	11:30	1588.10	3159.30	4747.40
6:00	12:00	2184.90	4037.90	6222.70
6:30	12:30	2933.50	6744.40	9677.90
7:00	13:00	2377.00	4596.70	6973.70
7:30	13:30	1785.90	2849.50	4635.40
8:00	14:00	2314.70	3824.50	6139.20
8:30	14:30	3617.50	6451.40	10069.00
9:00	15:00	3175.40	5648.30	8823.70
TOTAL		25723.25	50878.90	76602.25

Es importante mencionar que se eligió analizar los tres productos de la combustión mencionados (PM_{2.5}, CO y CO₂) debido a que, en el caso del contaminante PM_{2.5}, se tomaron estos resultados para realizar el proceso de validación del modelo desarrollado en FARSITE, pues los datos disponibles muestran la producción de este contaminante en el incendio forestal en el Ilaló para el día escogido. Por otro lado, el CO y CO₂ se utilizarán para desarrollar la segunda fase de este proyecto, referente a la simulación del modelo de dispersión de gases de combustión en COMSOL.

3.1.2 Validación del modelo desarrollado en FARSITE

El proceso de validación del modelo se lo realizará a partir de datos tomados del inventario de emisiones atmosféricas realizado para el mes de septiembre de 2015 en el Distrito Metropolitano de Quito (Espinosa, 2018). En este inventario se registraron emisiones de $PM_{2.5}$ para diversos días de septiembre de 2015, incluyendo el día 14. Analizando los resultados presentados en este trabajo, el inventario muestra que se produjeron 340 toneladas/día de $PM_{2.5}$ (Espinosa, 2018). El resultado del estudio realizado para el flujo másico de $PM_{2.5}$ en FARSITE, muestra que se produjeron 439 toneladas día de $PM_{2.5}$.

Tomando los dos resultados, experimental y teórico, y utilizando la ecuación (1), se obtiene un error porcentual experimental de 29%. Este resultado muestra que, a pesar de que el error porcentual exceda el 15% aceptable (Devore, 2011), es una buena primera aproximación.

3.2 Métodos de contención de la propagación del incendio

3.2.1 Primer método de contención

El primer método de contención de la propagación del incendio consistió en construir una barrera cortafuegos que impida el paso del fuego. Esto se realizó observando la trayectoria del fuego, en referencia al área afectada de la figura 16 y reemplazando los combustibles que encontrados en la barrera por vegetación que no se puede quemar. El resultado de este proceso se muestra en la figura 20.

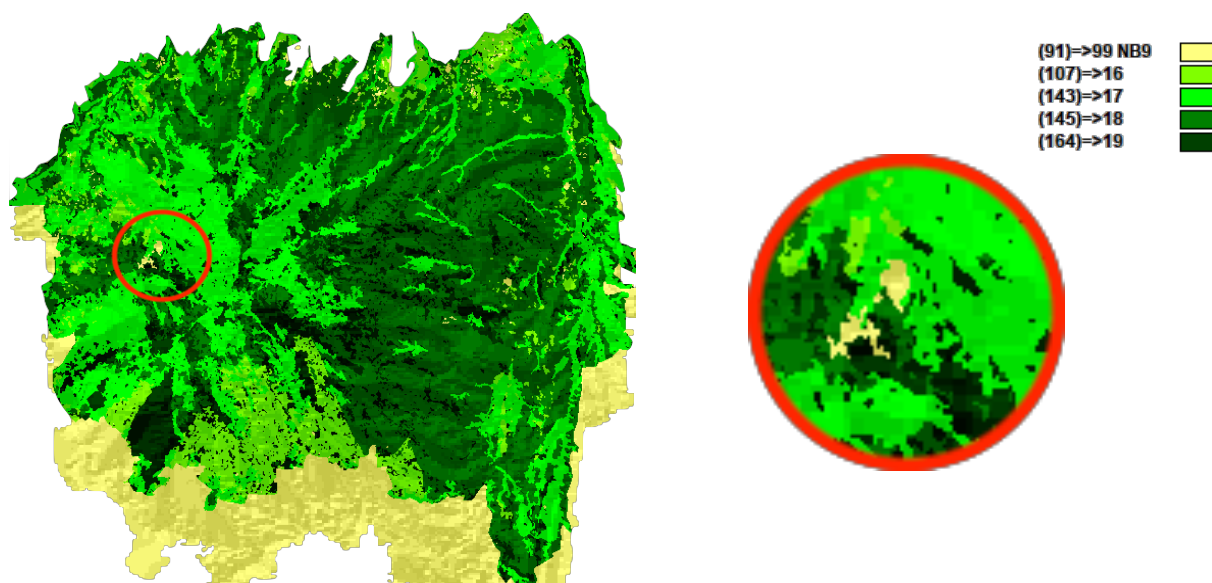


Figura 20. Primer método de contención de la propagación del incendio forestal (1 barrera cortafuegos)

En la figura 20 se puede observar el cortafuegos, encerrado en el círculo rojo y de color amarillo representado una vegetación de tipo NB, que se encuentra interviniendo la trayectoria del incendio presentado en la figura 16.

Localizando el mismo punto de ignición y bajo las mismas condiciones del día 14 de septiembre de 2015, se obtiene el resultado de área afectada por el incendio presentada en la figura 21.

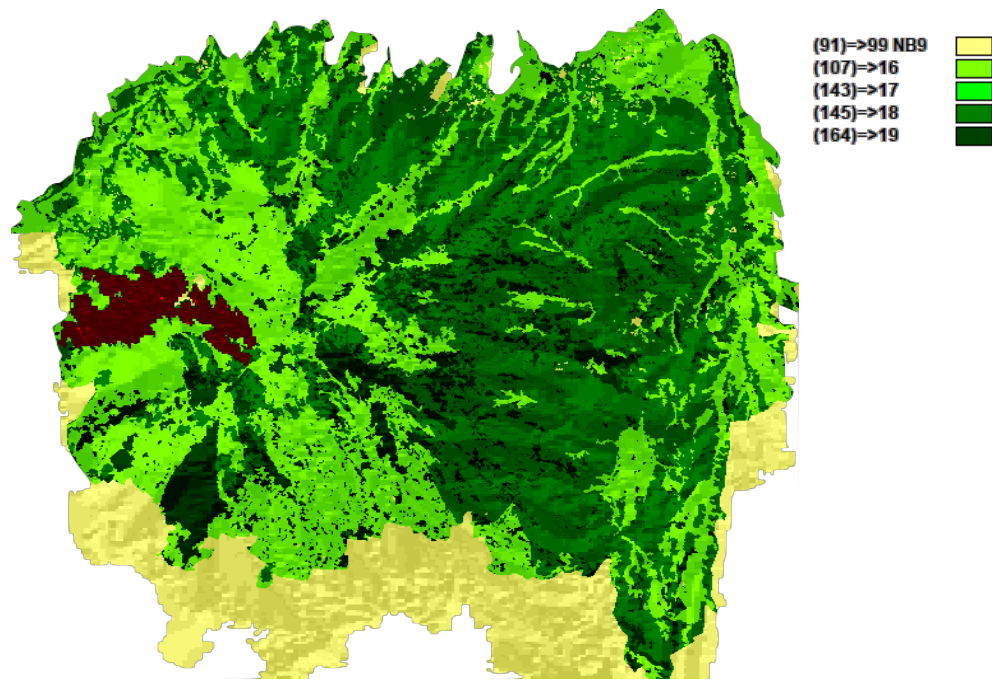


Figura 21. Área afectada por el incendio (zona roja) aplicando el primer método de contención mostrando un menor impacto comparado a la figura 16

Comparando las figuras 16 y 21, se puede notar, claramente, que el área afectada en la última figura es menor. Este es el efecto que se esperaba del cortafuegos, pues al ser un camino donde la vegetación no se puede quemar, el área afectada disminuye porque la tasa de propagación del fuego es menor debido a la barrera que encuentra el incendio conforme avanza por los combustibles presentes. Adicionalmente, se puede observar que la trayectoria del fuego, al momento de alcanzar la barrera, fue rodear el cortafuegos. De esta manera, observando la figura 20, el incendio no logró atravesar el cortafuegos y se dirigió por los lugares donde sí existía combustibles, correspondiendo al contorno inferior de la barrera. Esta barrera provoca una disminución de la propagación debido a que el incendio se demora más tiempo en encontrar un lugar con combustibles por donde expandirse.

3.2.2 Segundo método de contención

El segundo método de contención de la propagación del incendio consistió en construir dos barreras cortafuegos que impida el paso del fuego, de manera que el punto de ignición se encuentre en el medio de los dos cortafuegos.

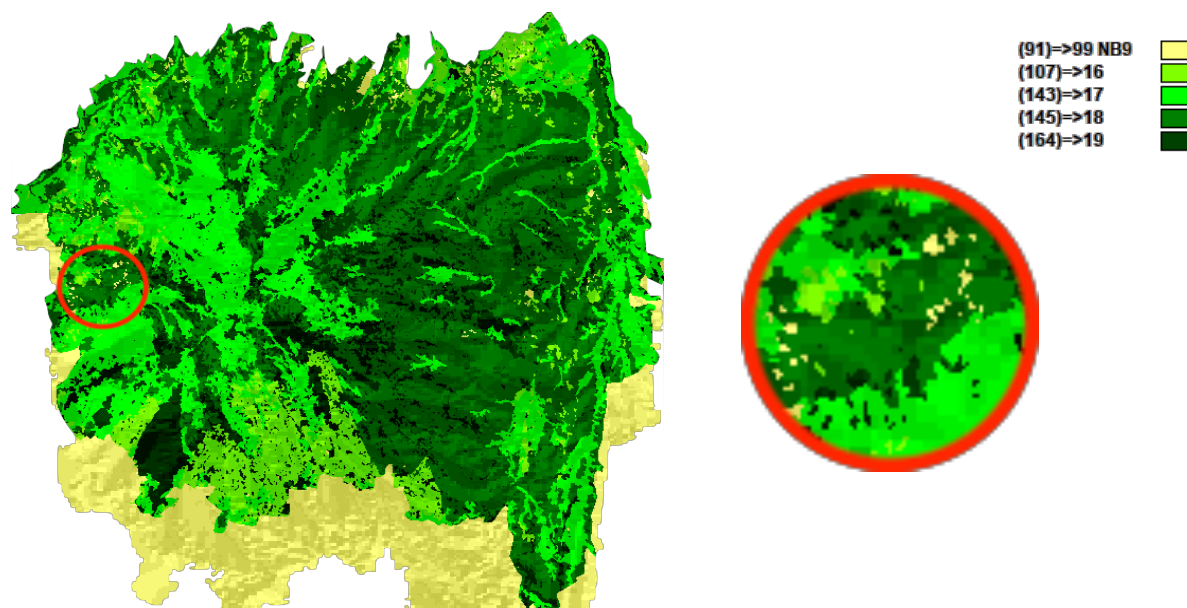


Figura 22. Segundo método de contención de la propagación del incendio forestal (2 barreras cortafuegos)

En la figura 22 se puede observar el resultado de la distribución de combustibles en el segundo método de contención. En el círculo rojo se presentan dos barreras cortafuegos encerrando en la mitad al punto de ignición del incendio forestal, cuya función es contener y disminuir la propagación de este.

Localizando el mismo punto de ignición y bajo las mismas condiciones del día 14 de septiembre de 2015, se obtiene el resultado de área afectada por el incendio presentada en la figura 23.

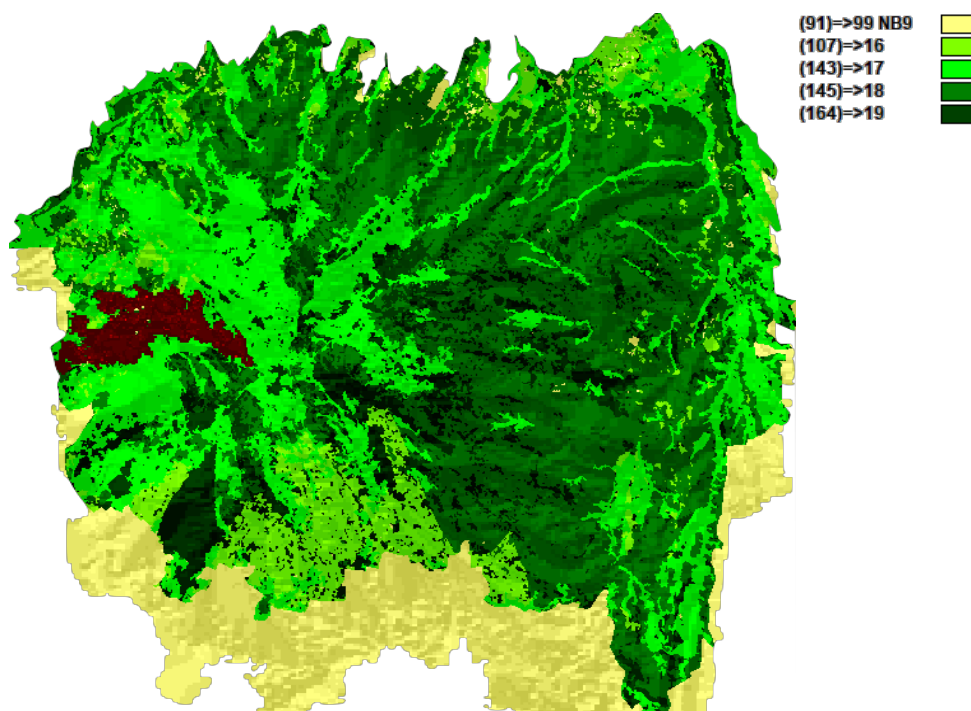


Figura 23. Área afectada por el incendio (zona roja) aplicando el segundo método de contención mostrando un impacto menor comparado a la figura 16

Comparando las figuras 16 y 23, se puede evidenciar que el área afectada aplicando el segundo método de contención fue menor, como era de esperarse. De igual manera que en primer método de contención estudiado anteriormente, la propagación del incendio forestal es menor debido a la presencia de las dos barreras que se interponen en su trayectoria, provocando que el fuego se demore en expandirse por los lugares donde encuentre combustibles.

Adicionalmente, al comparar las figuras 21 y 23, se puede observar que, en el primer caso, el incendio rodeó el cortafuegos por sus contornos para seguir avanzando. Por otro lado, en el segundo caso, el incendio sí logró cruzar el cortafuegos. Este último efecto se debe a la densidad de combustible reemplazado que no se puede quemar y los espacios que la barrera no logró cubrir. En la figura 20, correspondiente al primer método de contención, se observa que la cantidad de

combustible tipo NB por área, que conforma la barrera, es mayor al presentado en la figura 22. De igual manera, la continuidad de la barrera cortafuegos de la figura 20 difiere con los espacios sin cubrir de las barreras cortafuegos de la figura 22. Por lo tanto, los cortafuegos del segundo método de contención son más susceptibles a que el incendio los atravesase por su baja cantidad de combustible tipo NB por área y, al dejar varios espacios sin cubrir, el fuego se expande por estos lugares con menos dificultad.

3.2.3 Comparación con resultados obtenidos sin aplicar los métodos de contención

A continuación, se presenta la tabla 8, resumiendo los valores de área afectada por el incendio y toneladas producidas de CO, CO₂ y PM_{2.5} para los dos métodos de contención de la propagación del incendio forestal. Estos datos fueron extraídos de las tablas 10-17 presentadas en la sección Anexos.

Tabla 8. Resultados de la aplicación de los dos métodos de contención

Primer método (1 barrera cortafuegos)	
Área afectada [ha]	171
Cantidad de PM2.5 liberado [ton]	331
Cantidad de CO liberado [ton]	3750
Cantidad de CO2 liberado [ton]	56900
Segundo método (2 barreras cortafuegos)	
Área afectada [ha]	169
Cantidad de PM2.5 liberado [ton]	339
Cantidad de CO liberado [ton]	3850
Cantidad de CO2 liberado [ton]	57200

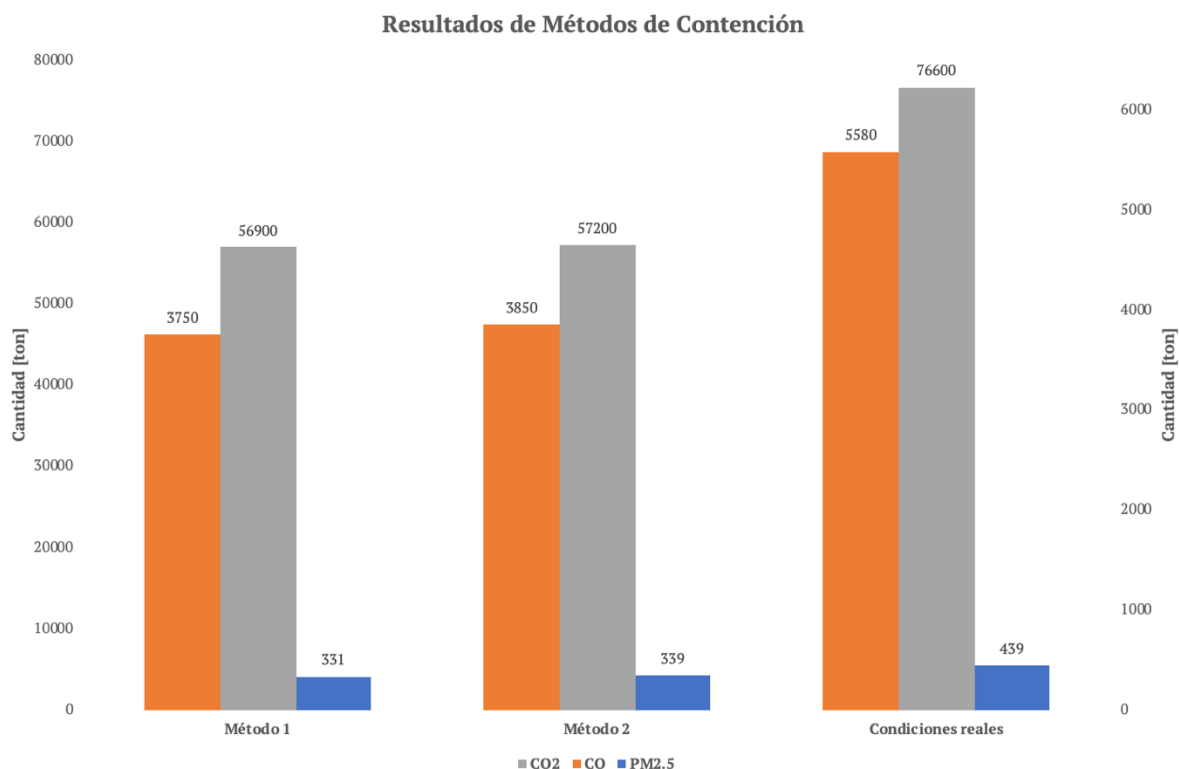


Figura 24. Resultado de métodos de contención mostrando la disminución de los contaminantes producidos

Comparando los resultados de la tabla 8 con los resultados de las tablas 4, 5, 6 y 7, se puede observar que la producción de PM_{2.5}, CO y CO₂ disminuyó por la presencia de los cortafuegos. De igual manera, el área afectada por el incendio fue menor. Es importante mencionar que el punto de ignición se mantuvo constante en todos los estudios, simulando las mismas condiciones en diferentes escenarios.

Adicionalmente, en la tabla 8 se observa que el primer método de contención tuvo un área afectada mayor al segundo método, pero sus producciones de PM_{2.5}, CO y CO₂ fueron menores. Esto se debe a la distribución no homogénea de combustibles pues las barreras provocan que el incendio cambie su trayectoria y alcance diferentes tipos de combustible de mayor o menor índice de combustión. Para el primer método, se puede decir que los combustibles que alcanzó, en

promedio, fueron de menor índice de combustión que los alcanzados en el segundo método.

Finalmente, se puede mencionar que los cortafuegos sí tuvieron un efecto positivo en la contención de la propagación del incendio forestal.

3.3 Modelo de dispersión de gases de combustión en COMSOL

4.3.1 Resultados del modelo de dispersión de CO y CO₂

En primer lugar, es importante mencionar las suposiciones que se realizaron en el modelo para simplificar el tiempo de simulación del estudio. En referencia al campo vectorial correspondiente a la hora presentado en la figura 7 y las figuras 35-42 presentadas en la sección Anexos, se puede observar un comportamiento del campo vectorial similar en ciertas horas. Desde la hora 6 hasta la hora 8, el campo del viento cumple con la misma tendencia de dirección. Adicionalmente, desde la hora 9 hasta la hora 14, la dirección del viento es bastante similar en todos los casos. Por lo tanto, con el motivo de facilitar el cálculo de los campos vectoriales en COMSOL y reducir el tiempo de simulación, se optó por resolver dos campos vectoriales: el primero correspondiente a la hora 6 y el segundo de la hora 12. Con esto, se aseguró que los campos resueltos cumplan con las dos tendencias observadas de la dirección de viento. Las simulaciones realizadas para cada hora fueron ligadas con una de las dos soluciones de campo de velocidad que cumplió la tendencia descrita en dicha hora.

Utilizando las ecuaciones (13), (14) y (15), se obtuvieron las soluciones de los campos de velocidad del viento presentados en las figuras 24 y 25.

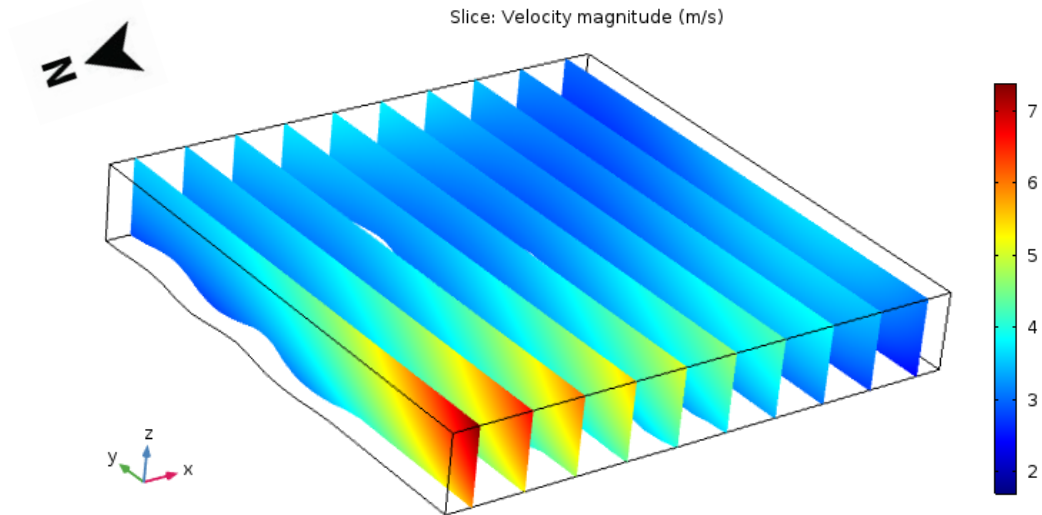


Figura 25. Magnitud de velocidad [m/s] del campo vectorial del viento en la hora 6 mostrando un incremento de velocidades en los puntos superiores del dominio

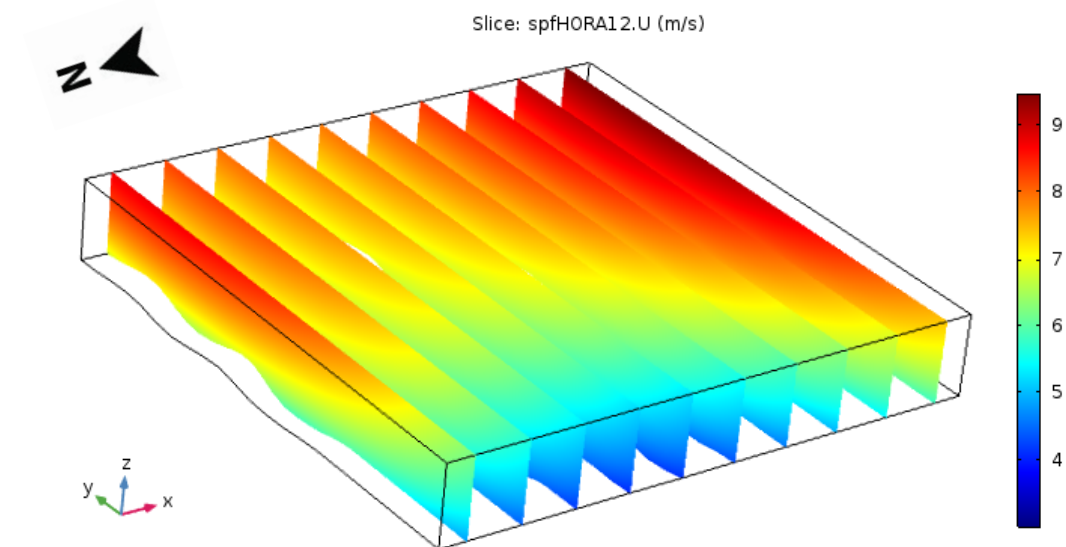


Figura 26. Magnitud de velocidad [m/s] del campo vectorial del viento en la hora 12 mostrando un incremento de velocidades en los puntos superiores del dominio

Observando las figuras 24 y 25, se puede notar que la solución de COMSOL para este fenómeno, cumple con lo esperado al aplicar la ecuación (15). Tomando un punto en el plano y fijando diferentes valores en el eje z para este punto, se puede observar que la magnitud de la velocidad aumenta conforme aumenta el valor en el eje z, es decir, la altura. El fenómeno descrito en las figuras 24 y 25 cumple con el principio de la función de potencia para geometrías complejas, siendo la velocidad del viento mayor en puntos más altos desde la superficie (Bitsuamlak, 2004). El principio se cumple para todos los puntos en el dominio del Volcán Ilaló, como se puede observar en planos yz de corte presentados dentro de este dominio.

Para el modelo de transporte de los gases de combustión, fue necesario determinar los flujos molares por metro cuadrado de monóxido y dióxido de carbono a partir de las tablas 5, 6 y 7. Estos resultados se muestran en la tabla 9.

Tabla 9. Flujo molar de CO y CO₂ para cada hora de duración del incendio forestal

Hora	Flujo molar CO por m² (mol/m² s)	Flujo molar CO₂ por m² (mol/m² s)
6:00-7:00	8.22E-04	1.38E-03
7:00-8:00	1.71E-04	3.33E-04
8:00-9:00	1.31E-04	3.23E-04
9:00-10:00	1.57E-04	4.83E-04
10:00-11:00	5.30E-05	3.03E-04
11:00-12:00	3.91E-05	2.66E-04
12:00-13:00	2.98E-05	2.42E-04
13:00-14:00	2.75E-05	2.28E-04
14:00-15:00	2.62E-05	2.28E-04

En la tabla 9 se puede observar que el flujo molar por unidad de área de ambos gases de combustión, en la mayoría de los casos, disminuye conforme las

horas del día aumentan. Este comportamiento se debe al aumento del área afectada presentada en la tabla 5.

Por otro lado, en las figuras 26-34 se presentan los resultados del modelo de dispersión del monóxido de carbono (CO) producidos en el incendio forestal, cuando interactúa con los campos vectoriales de las figuras 24 y 25, en sus respectivas horas.

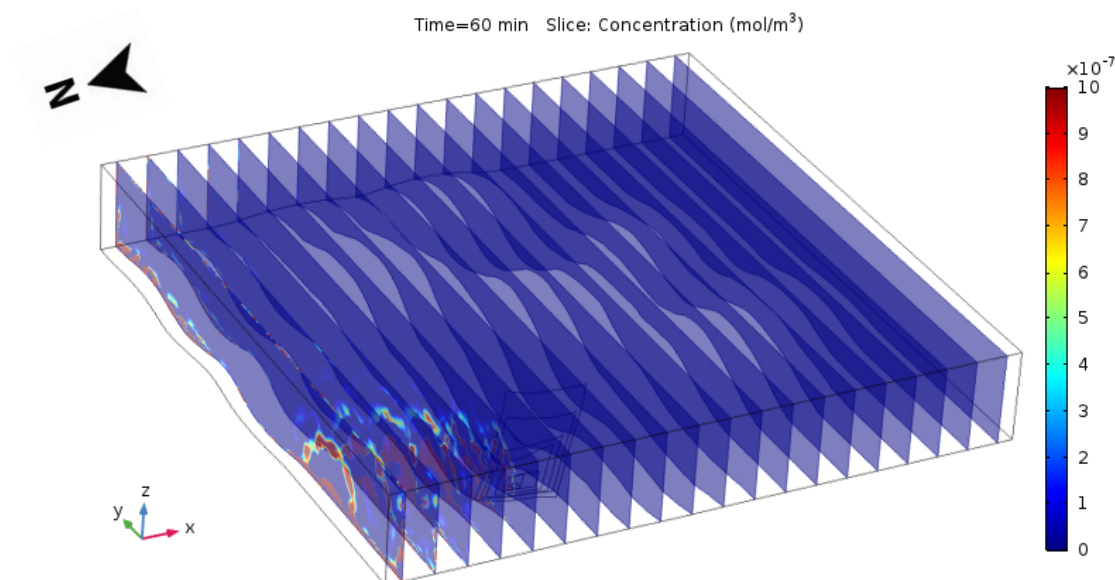


Figura 27. Concentración de CO [mol/m³] en la hora 6 del 14 de septiembre de 2015 mostrando un transporte de la especie hacia el norte

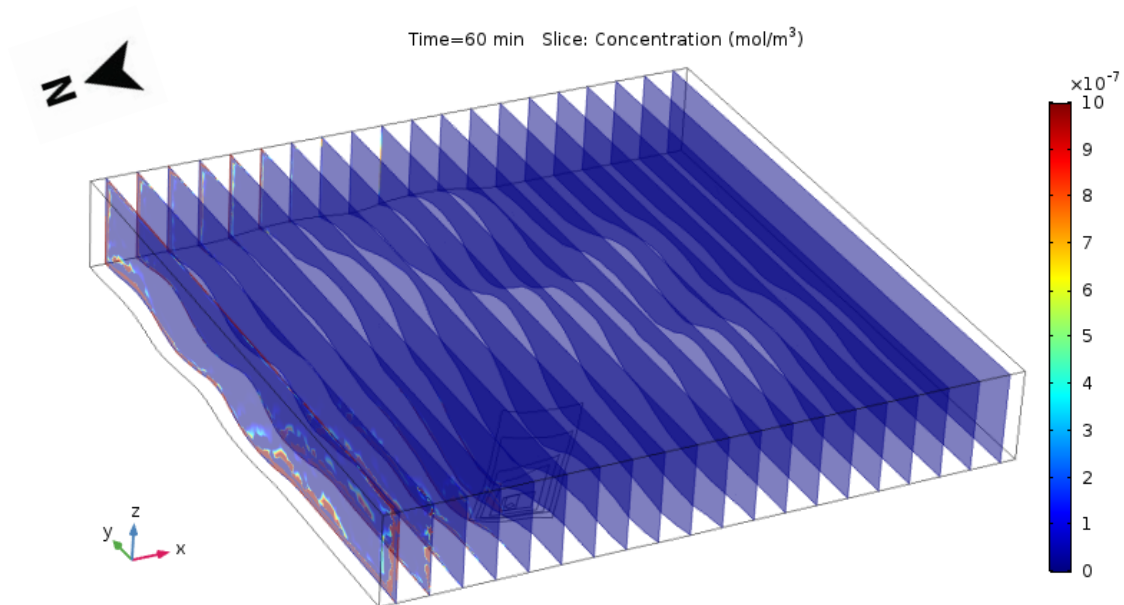


Figura 28. Concentración de CO [mol/m³] en la hora 7 del 14 de septiembre de 2015 mostrando un transporte de la especie hacia el norte

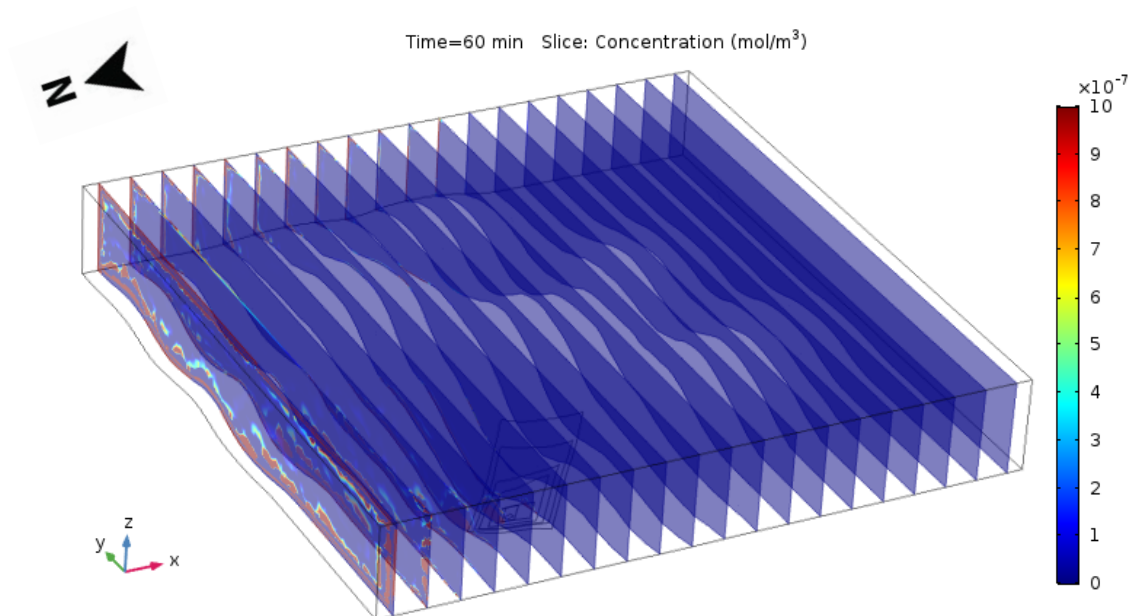


Figura 29. Concentración de CO [mol/m³] en la hora 8 del 14 de septiembre de 2015 mostrando un transporte de la especie hacia el norte

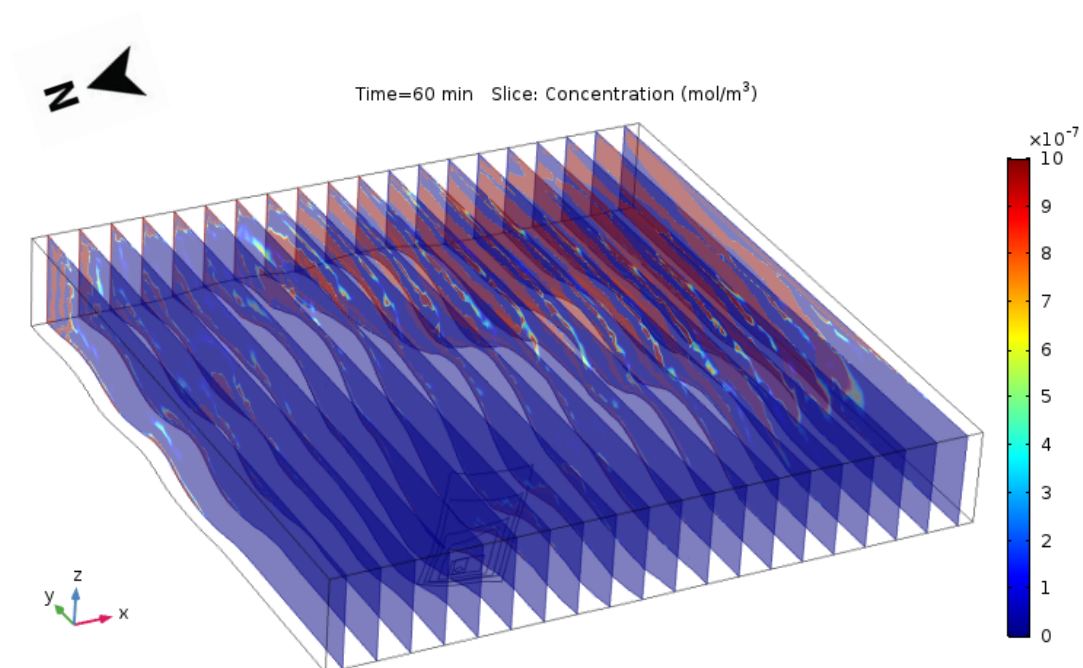


Figura 30. Concentración de CO [mol/m³] en la hora 9 del 14 de septiembre de 2015 mostrando un transporte de la especie hacia el sur

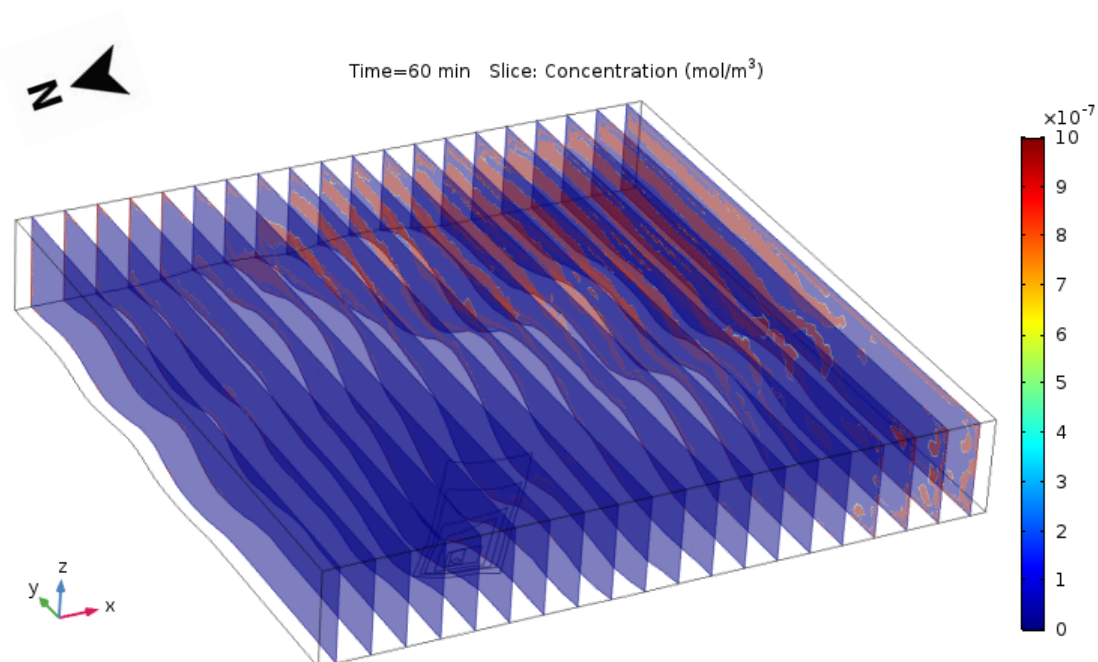


Figura 31. Concentración de CO [mol/m³] en la hora 9 del 14 de septiembre de 2015 mostrando un transporte de la especie hacia el sur

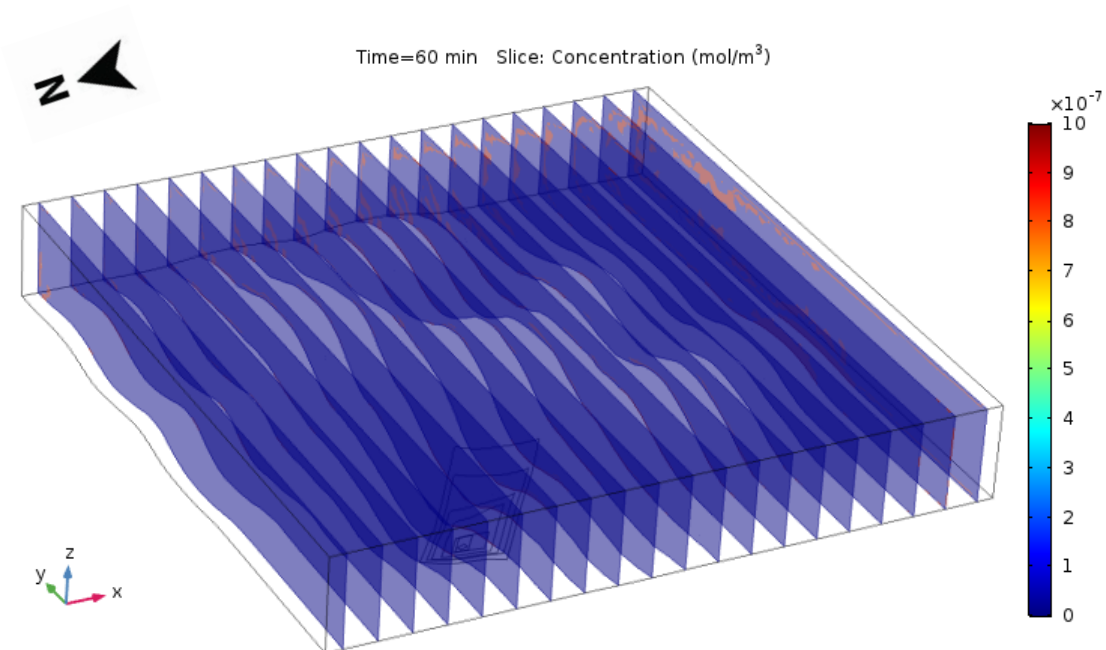


Figura 32. Concentración de CO [mol/m³] en la hora 11 del 14 de septiembre de 2015 mostrando un transporte de la especie hacia el sur y difusión en el aire

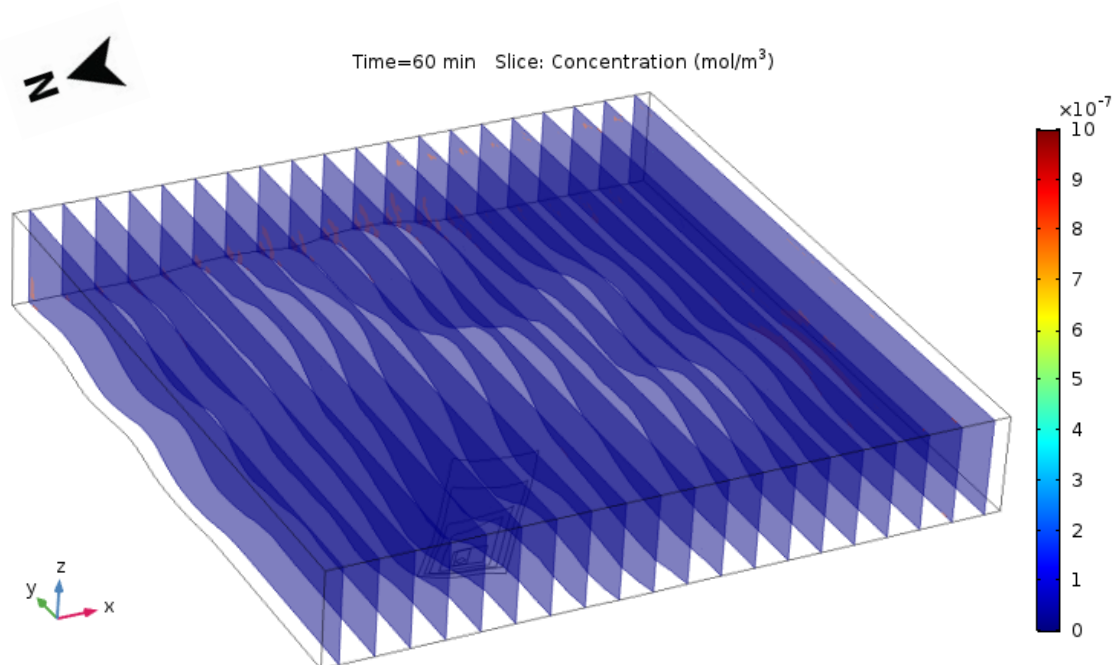


Figura 33. Concentración de CO [mol/m³] en la hora 12 del 14 de septiembre de 2015 mostrando un transporte de la especie hacia el sur y difusión en el aire

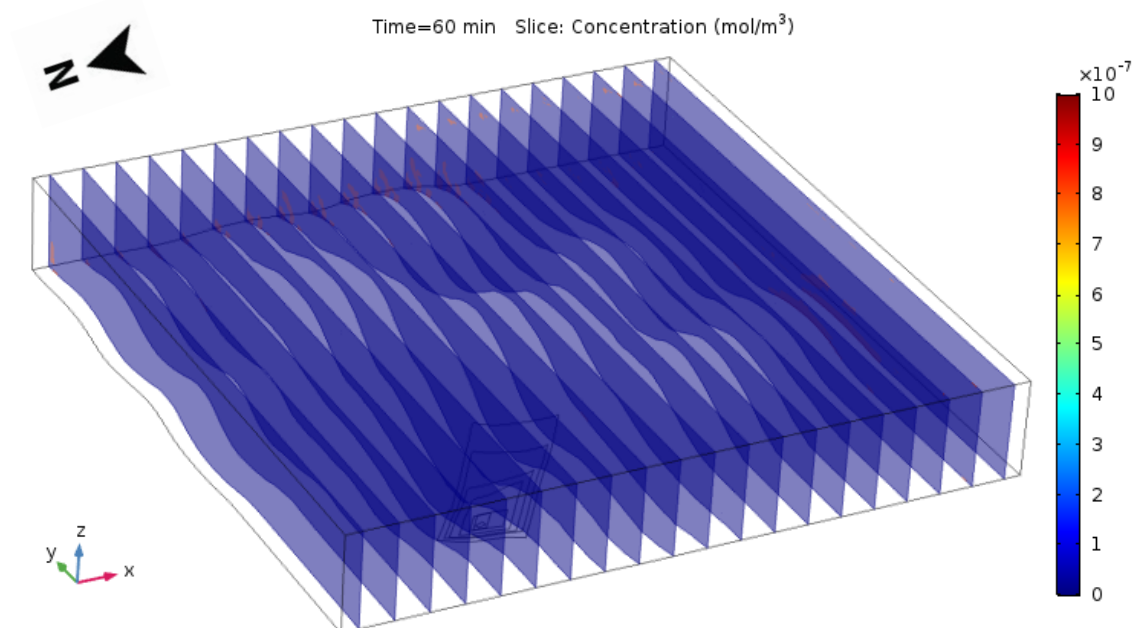


Figura 34. Concentración de CO [mol/m³] en la hora 13 del 14 de septiembre de 2015 mostrando un transporte de la especie hacia el sur y difusión en el aire

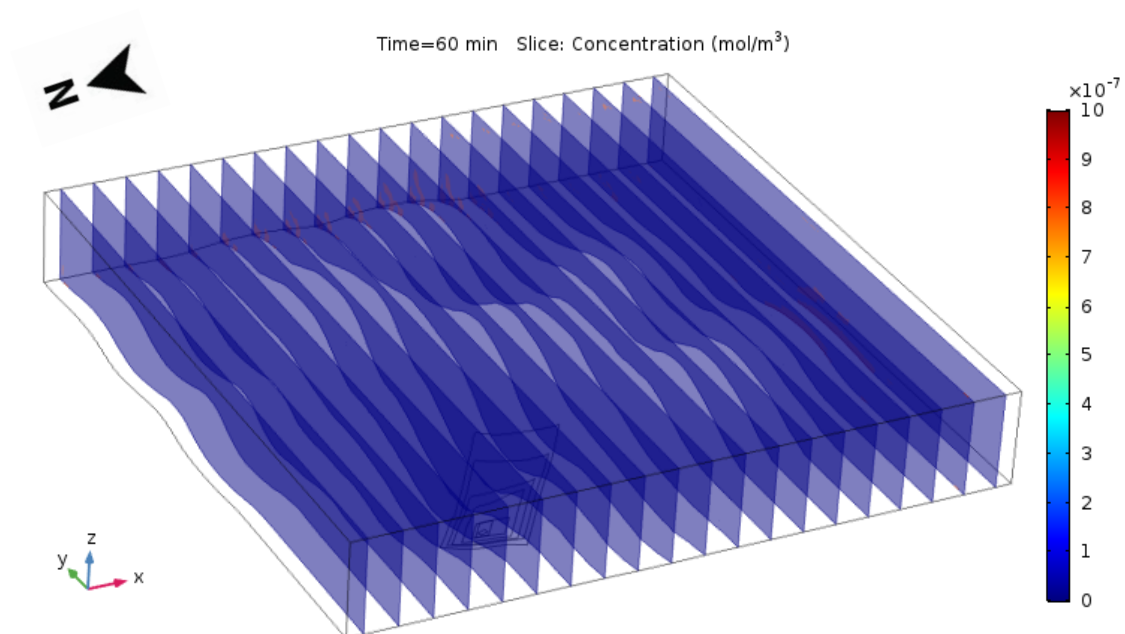


Figura 35. Concentración de CO [mol/m³] en la hora 14 del 14 de septiembre de 2015 mostrando un transporte de la especie hacia el sur y difusión en el aire

A partir de las figuras anteriores, se puede observar el comportamiento del monóxido de carbono liberado en el incendio forestal cuando interactúa con el viento. En efecto, se observa que el transporte de la especie es diferente en cada hora, de acuerdo con la dirección del campo vectorial correspondiente, el flujo molar del gas y el área afectada. Adicionalmente, en todas las figuras se puede observar la dirección del viento al identificar en qué dirección el gas está siendo transportado. En las figuras 26, 27 y 28 se observa que la dirección el viento, así como el transporte del monóxido de carbono, es la misma para los tres casos. Contrastando estos resultados con las figuras 7, 35 y 36, se observa que la dirección no corresponde exactamente con la dirección de los vectores de las últimas tres figuras, al estar desfasados, aproximadamente, en 90 grados entre ambos. Este resultado puede explicarse por una solución incorrecta obtenida en COMSOL. Si se observa la ecuación (13), correspondiente a la regresión de las velocidades del viento, se puede notar que la ecuación consta de 10 variables que deben ser resueltas para cada punto en el dominio que tiene una extensión de 7 km x 7 km x 1 km. Existe la posibilidad de que algunos de los resultados matemáticos no concuerden con el fenómeno físico y la solución, en ciertos puntos, es diferente a la esperada en la realidad. Es importante mencionar que COMSOL busca obtener una solución numérica para todos los puntos del dominio y no solamente para uno, con lo que, si existe algún resultado que no concuerde con la tendencia de los anteriores, el programa optaría por asignar un resultado que cumpla con la tendencia de la mayoría de los puntos.

Por otro lado, observando la dirección del transporte del monóxido de carbono, y del viento, en las figuras 29 - 34 y al contrastar estos resultados con las figuras 37- 42, se puede notar que, en ambos casos, el viento tiene la misma

dirección. Por lo tanto, en estos casos, COMSOL sí logró obtener una solución que refleja la dirección real del viento desde las 9 a las 14 horas en el Volcán Ilaló.

Ahora bien, las figuras 26 – 34 muestran el transporte del monóxido de carbono durante las 9 horas de duración del estudio. Se observan varios comportamientos conforme se avanza en cada hora del día. Cabe recalcar que, en el estudio de transporte de la especie realizado, para monóxido y dióxido de carbono, se identifica al aire como el diluyente. En la hora 6, cuando el incendio recién empieza, se observa cómo el viento transporta el monóxido de carbono. En la hora 8, cuando el viento sigue manteniendo la misma dirección que las horas anteriores, se puede apreciar que la concentración de CO aumentó, pues se observa una mayor presencia del gas en los planos de corte de la figura 28. A partir de la hora 9, la dirección del viento cambia y transporta el CO hacia el sur de la montaña, correspondiente al sector Valle de los Chillos – El Tingo. En la figura 29 se puede apreciar claramente el cambio de dirección pues, en el transporte de la especie, se puede observar un cambio de ubicación en la concentración del gas, apareciendo mayores concentraciones en el sur de la montaña. Adicionalmente, se observa la tendencia que los gases sean trasladados en esta dirección. En la figura 30, correspondiente a la hora 10, se observa que la tendencia de la hora anterior se mantiene, con el único cambio de que las concentraciones, de la ubicación norte – noreste de la montaña, desaparecen. En la transición de estas horas se puede observar claramente el cambio de dirección del viento, pues la concentración de CO comienza a acumularse en la zona sur de la montaña. A partir de la hora 11 hasta la hora 14, cuando la duración del estudio termina, se puede apreciar la dilución del CO en el aire debido al gran flujo másico de aire en relación con el flujo másico del gas. Esta dilución se debe a que, en las horas finales del incendio, el flujo másico de

CO es menor debido a una disminución de la biomasa presente que se pueda quemar. Por lo tanto, al presentarse una disminución en el flujo másico de CO y el mismo volumen de aire dentro del dominio, es decir, manteniendo el mismo flujo másico, el aire diluirá más rápido la concentración de CO presente en estas horas.

La tendencia mencionada anteriormente también se puede observar que las figuras 43-51 de la sección Anexos, correspondientes al modelo de dispersión de CO₂. En este caso, el flujo másico es mayor debido a que las toneladas de CO₂ liberadas a la atmósfera durante el incendio forestal fueron mayores que las de CO. A partir de estos resultados, se observa una mayor concentración de CO₂ en el dominio cuya trayectoria de mantiene en dirección norte desde la hora 6 hasta la hora 8 y desde la hora 9 hasta la hora 14, en dirección sur hacia el Valle de los Chillos. Adicionalmente, al igual que en el CO, en las horas finales del incendio el CO₂ se diluye en el aire por la disminución de su flujo másico en este intervalo debido al decremento de la biomasa en el lugar.

4.3.2 Validación del modelo de dispersión desarrollado en COMSOL

Para validar el modelo de dispersión de ambos gases, en un inicio, se planteó comparar los resultados obtenidos en la simulación con los datos registrados en las estaciones de la Red de Monitoreo Atmosférico del Distrito Metropolitano de Quito, presentados por la Secretaría de Ambiente. Las estaciones cercanas al lugar de estudio de este proyecto, es decir, al Volcán Ilaló, corresponden a Tumbaco y Valle de Los Chillos. Por lo tanto, se eligieron estas estaciones para comparar la concentración de CO en el día 14 de septiembre de 2015. Adicionalmente, observando la dirección del viento desde la hora 9 hasta la hora 14, se aprecia que se dirige al sur de la montaña, sector que corresponde al Valle de Los Chillos.

Al observar los datos históricos registrados, se pudo notar que sólo existían mediciones para la estación ubicada en el Valle de Los Chillos. Las mediciones en la estación de Tumbaco no fueron registradas. Por otro lado, observando detalladamente los datos se pudo notar que la variación de concentración de CO del 14 de septiembre de 2015 con relación a los otros días y meses del año no fue significativa. Se presume que la estación no pudo detectar las concentraciones de CO producidas por el incendio forestal en el día 14 o, por otro lado, que las concentraciones de CO fueron mínimas y no se pudieron distinguir entre las emisiones de un día normal del año 2015.

Por esta razón, el modelo de dispersión de gases no se pudo validar con los datos reales registrados, al no tener información exacta de la concentración de CO producida en el incendio forestal el día 14 de septiembre de 2015.

4. CONCLUSIONES

En primer lugar, se logró utilizar los softwares QGIS y FARSITE para simular la propagación del fuego en el incendio forestal del día 14 de septiembre de 2015 en el Volcán Ilaló, considerando su topografía, el tipo de vegetación y las condiciones meteorológicas del día de estudio. Con el resultado de esta simulación, se lograron obtener datos de los contaminantes producidos y el área afectada por el incendio. Adicionalmente, se logró validar la simulación de FARSITE al obtener un error experimental del 29% entre los datos teóricos y experimentales.

En segundo lugar, a partir de los resultados obtenidos en FARSITE cuando el método fue validado, se logró desarrollar un modelo de dispersión de los contaminantes CO y CO₂ en COMSOL, que permitió visualizar la interacción y el comportamiento de estos gases con el campo vectorial del viento del 14 de septiembre de 2015. A partir de estos resultados, fue posible observar la trayectoria de los gases y como se dispersaron dentro del volumen de control, permitiendo ubicar el sector geográfico al cual la mayoría de los gases fueron transportados, correspondiendo al Valle de los Chillos. Por otro lado, el proceso de validación de este modelo no fue posible debido a la falta de datos exactos de concentraciones de los contaminantes en las estaciones de la Red de Monitoreo Atmosférico del Distrito Metropolitano de Quito.

Finalmente, se logró estudiar dos métodos de contención de la propagación de incendios forestales en FARSITE utilizando barreras cortafuegos distribuidas de dos maneras diferentes. Los resultados de producción de contaminantes y área afectada aplicando los métodos de contención fueron menores a los registrados en condiciones reales del día 14 de septiembre de 2015. Esta disminución del impacto

del incendio señaló que las barreras cortafuegos sí ayudan a contener la propagación del fuego en un incendio forestal.

5. RECOMENDACIONES

- A partir de los tipos de combustibles en el Ilaló, realizar un análisis más exhaustivo para ingresar más variables a FARSITE que no fueron cubiertas en este proyecto.
- Obtener más datos sobre la vegetación presente en el Ilaló, de esta manera se pueden proporcionar más variables a FARSITE para desarrollar un modelo más preciso.
- Estudiar alternativas diferentes de modelar el campo vectorial del viento en tres dimensiones y minimizar los errores de estos modelos con los datos reales.
- Realizar la simulaciones en COMSOL en computadoras con mayores capacidades de procesamiento, de manera que se puede realizar un mallado más fino al dominio para descartar errores producidos por el tamaño de la malla (independencia del mallado).
- Modelar la dispersión del material particulado, con el fin de obtener más datos experimentales para validar el modelo.
- Estudiar métodos diferentes de medición de áreas afectadas y gases de combustión producidos en los incendios forestales que tengan la capacidad de medir la mayor cantidad de datos reales posibles. Con estos resultados, se podría validar de mejor manera la simulación y establarla como modelo predictivo para estudiar mejores métodos de mitigación y prevención de incendios forestales en el Volcán Ilaló y proyectarlo al todo el Distrito Metropolitano de Quito.

6. REFERENCIAS

- Anderson, J. D., & Wendt, J. (1995). *Computational fluid dynamics* (Vol. 206). New York: McGraw-Hill.
- Bardina, J.E., Huang, P.G., Coakley, T.J. (1997). *Turbulence Modeling Validation, Testing, and Development*. NASA Technical Memorandum 110446.
- Beltrán, B. (2015). Tres frentes del Ilaló arden sin pausa. *El Comercio*. Recuperado el 21 de octubre de 2018 desde: <https://www.elcomercio.com/actualidad/incendio-ilalo-arde-riesgo-bomberos.html>
- Bitsuamlak, G. T., Stathopoulos, T., & Bédard, C. (2004). Numerical Evaluation of Wind Flow over Complex Terrain: Review. *Journal of Aerospace Engineering*, 17(4), 135–145. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0893-1321\(2004\)17:4\(135\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0893-1321(2004)17:4(135))
- Cengel, Y. A., & Boles, M. A. (2002). *Thermodynamics: an engineering approach*. Sea, 1000, 8862.
- COMSOL. (2012). *COMSOL Multiphysics User's Guide*. COMSOL 4.3. Recuperado el 18 de noviembre de 2018 desde: <https://www.comsol.com/documentation>
- Chang, R. (2009). *Química*. México DF: McGraw-Hill.
- Department of Fire & Emergency Services. (s/f). A guide to constructing and maintaining fire-breaks. Government of Western Australia. Department of Fire & Emergency Services. Rural fire division.
- Devore, J. L. (2011). *Probability and Statistics for Engineering and the Sciences*. Cengage learning.
- El Telégrafo. (2015). Incendios forestales quemaron 3102 hectáreas en Quito. *El Telégrafo*. Recuperado el 21 de octubre de 2018 desde: <https://www.eltelegrafo.com.ec/noticias/quito/1/incendios-forestales-quemaron-3-102-hectareas-en-quito>
- El Telégrafo. (2015). Nube de humo cubre Quito por los incendios forestales. *El Telégrafo*. Recuperado el 21 de octubre de 2018 desde: <https://www.eltelegrafo.com.ec/noticias/quito/1/nube-de-humo-cubre-quito-por-los-incendios-forestales>
- Espinosa, K. (2018). *Inventario de emisiones atmosféricas producidas por incendios forestales en el Distrito Metropolitano de Quito. Septiembre de 2015*. Universidad San Francisco de Quito. Quito.
- Fernandez-Pello, A. C. (2017). Wildland fire spot ignition by sparks and firebrands. *Fire Safety Journal*, 91(May), 2–10. <https://doi.org/10.1016/j.firesaf.2017.04.040>

- Fiates, J., Santos, R. R. C., Neto, F. F., Francesconi, A. Z., Simoes, V., & Vianna, S. S. V. (2016). An alternative CFD tool for gas dispersion modelling of heavy gas. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 44, 583–593. <https://doi.org/10.1016/j.jlp.2016.08.002>
- Finney, M. A. (1998). FARSITE : Fire Area Simulator — Model Development and Evaluation. *USDA Forest Service Research Paper*, (February), 47. [https://doi.org/U.S. Forest Service Research Paper RMRS-RP-4 Revised](https://doi.org/U.S.ForestServiceResearchPaperRMRS-RP-4Revised)
- Google Earth. (s/f). [Mapa de Cerro Ilaló, Ecuador en Google Earth]. Recuperado el 5 noviembre de 2018 desde: <https://earth.google.com/web/@-0.2579203,-78.4198952,2977.93405447a,5746.0315057d,35y,0h,0t,0r>
- Heredia, V. (2015). El Gobierno dice que gestiona ayuda internacional por incendios forestales. *El Comercio*. Recuperado el 21 de octubre de 2018 desde: <https://www.elcomercio.com/actualidad/gobierno-gestion-ayuda-internacional-incendios.html>
- Heriyanto, E., Syaufina, L., & Sobri, M. (2015). Forecasting Simulation of Smoke Dispersion from Forest and Land Fires in Indonesia. *Procedia Environmental Sciences*, 24, 111–119. <https://doi.org/10.1016/j.proenv.2015.03.015>
- INAMHI. (2014). *Análisis de las condiciones climáticas registradas en el Ecuador continental en el año 2013 y su impacto en el sector agrícola*. Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología. Ecuador. Recuperado el 21 de octubre de 2018 desde: <http://www.serviciometeorologico.gob.ec/wpcontent/uploads/2014/01/Informe2014SNGR.pdf>
- Lange, J., Mann, J., Angelou, N., Berg, J., Sjöholm, M., & Mikkelsen, T. (2016). Variations of the Wake Height over the Bolund Escarpment Measured by a Scanning Lidar. *Boundary-Layer Meteorology*, 159(1), 147–159. <https://doi.org/10.1007/s10546-015-0107-8>
- Liang, J. (2013). *Chemical Modeling for Air Resources Fundamentals, Applications and Corroborative Analysis*. 1st Edition. Academic Press.
- McDonald, J. H. (2009). *Handbook of biological statistics* (Vol. 2). Baltimore, MD: sparky house publishing.
- Ministerio de Turismo. (s/f). El Tingo se consolida como un atractivo turístico. Ministerio de Turismo. Gobierno de la República del Ecuador. Recuperado el 8 de noviembre de 2018 desde: <https://www.turismo.gob.ec/el-tingo-se-posesiona-como-un-atractivo-turistico/>
- Munson, B. R., Okiishi, T. H., Rothmayer, A. P., & Huebsch, W. W. (2014). *Fundamentals of fluid mechanics*. John Wiley & Sons.

- Navarro, F., Calderón, C., Sapiña, G. (2015). *Infraestructuras de prevención de incendios forestales*. Red Eléctrica de España. Consejo de Gobernación y Justicia.
- QGIS Project. (2018). QGIS User Guide Release 2.18. Recuperado el 5 de noviembre de 2018 desde: <https://docs.qgis.org/2.18/pdf/en/QGIS-2.18-UserGuide-en.pdf>
- Redacción Quito. (2015). El INAMHI dice que el invierno sigue retrasado. *El Comercio*. Recuperado el 21 de octubre de 2018 desde: <https://www.elcomercio.com/actualidad/inamhi-quito-clima-invierno-sol.html>
- Scott, J. H., & Burgan, R. E. (2005). Standard fire behavior fuel models: a comprehensive set for use with Rothermel's surface fire spread model, (June). <https://doi.org/10.2737/RMRS-GTR-153>
- Secretaría de Ambiente. (2013). *Caracterización del Área de Intervención Especial y Recuperación Volcán Ilaló y Bosque Protector Flanco Oriental del Volcán Pichincha y Cinturón Verde de Quito (Bloque 8)*. Secretaría de Ambiente. Municipio del Distrito Metropolitano de Quito.
- Secretaría de Ambiente. (2018). Datos Horarios Históricos Red de Monitoreo de la Calidad del Aire. Secretaría de Ambiente. Municipio del Distrito Metropolitano de Quito. Recuperado el 5 de noviembre de 2018 desde: <http://www.quitoambiente.gob.ec/ambiente/index.php/datos-horarios-historicos>
- Secretaría Nacional de Gestión de Riesgos. (2013). *Mapa de probabilidad de generación de incendios forestales con focos de calor*. Quito. Recuperado el 23 de octubre de 2018 desde: https://www.gestionderiesgos.gob.ec/wp-content/uploads/downloads/2013/09/Mapa_IF-FC_30092013.pdf
- Senterre, B. (2009). *Cost-effective techniques for the rehabilitation of burned and degraded lands in the Seychelles*. Capacity Development for Sustainable Land Management. Recuperado el 21 de noviembre de 2018 desde: https://www.researchgate.net/publication/287782063_Implementation_of_post_fire_rehabilitation_trials_on_the_island_of_Praslin_Seychelles
- University of Iowa. (2017). Percent Error Formula. University of Iowa Department of Physics and Astronomy. Recuperado el 6 de noviembre de 2018 desde: <http://astro.physics.uiowa.edu/ITU/glossary/percent-error-formula/>
- USDA Forest Service. (2007). *FARSITE Reference Guide*. Fire, Fuel, Smoke Science Program Rocky Mountain Research Station. United States Department of Agriculture.
- Van Hees, P. (2013). Validation and verification of fire models for fire safety engineering. *Procedia Engineering*, 62, 154–168. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2013.08.052>

- Wang, H., Van Eyk, P. J., Medwell, P. R., Birzer, C. H., Tian, Z. F., & Possell, M. (2016). Identification and Quantitative Analysis of Smoldering and Flaming Combustion of Radiata Pine. *Energy and Fuels*, 30(9), 7666–7677. <https://doi.org/10.1021/acs.energyfuels.6b00314>
- Wilcox, D. (1998). *Turbulence Modeling for CFD*. Second edition. Anaheim: DCW Industries, 1998. pp. 174.
- Williams, B. J., Song, B., & Williams, T. M. (2013). Visualizing mega-fires of the past: A case study of the 1894 Hinckley Fire, east-central Minnesota, USA. *Forest Ecology and Management*, 294, 107–119. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2012.12.008>

ANEXOS

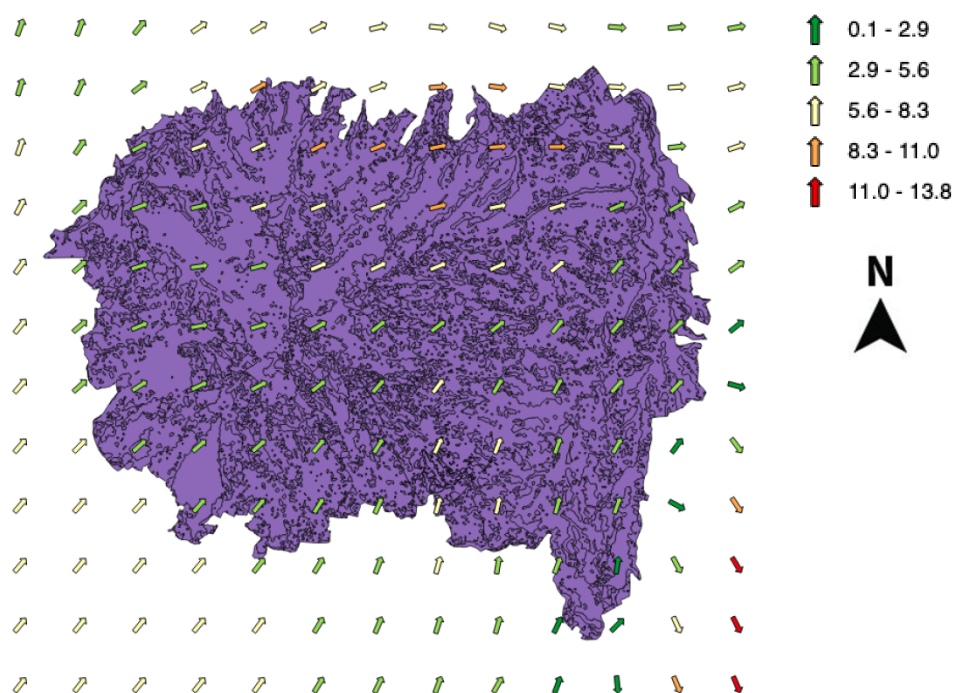


Figura 36. Velocidad [km/h] y dirección del viento en el Volcán Ilaló a las 6:00

AM del 14 de septiembre de 2015

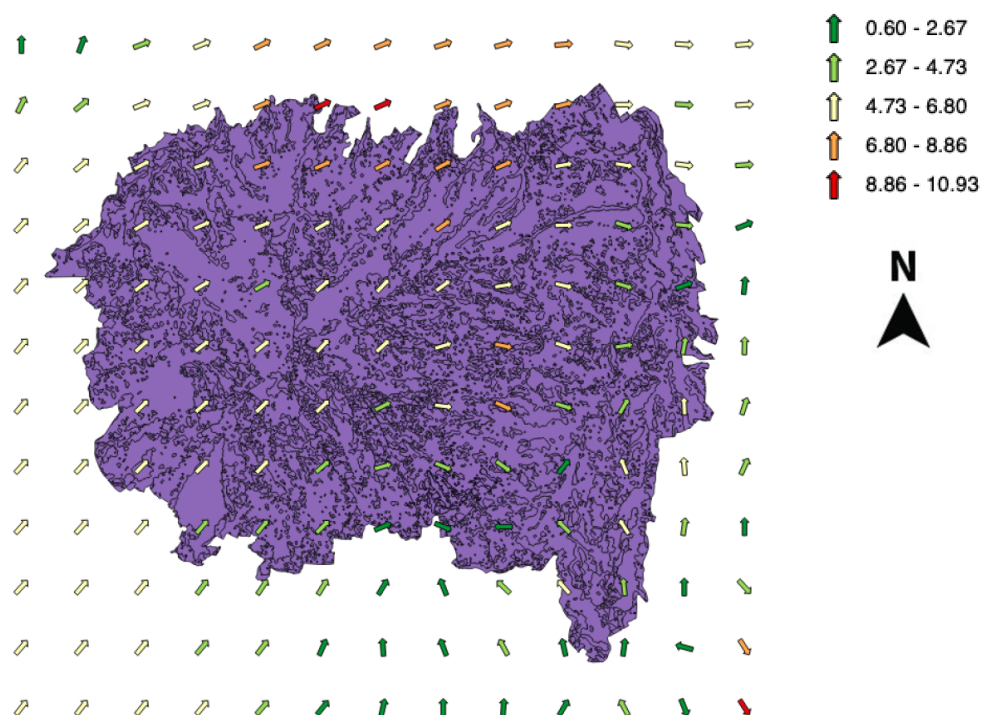


Figura 37. Velocidad [km/h] y dirección del viento en el Volcán Ilaló a las 7:00

AM del 14 de septiembre de 2015

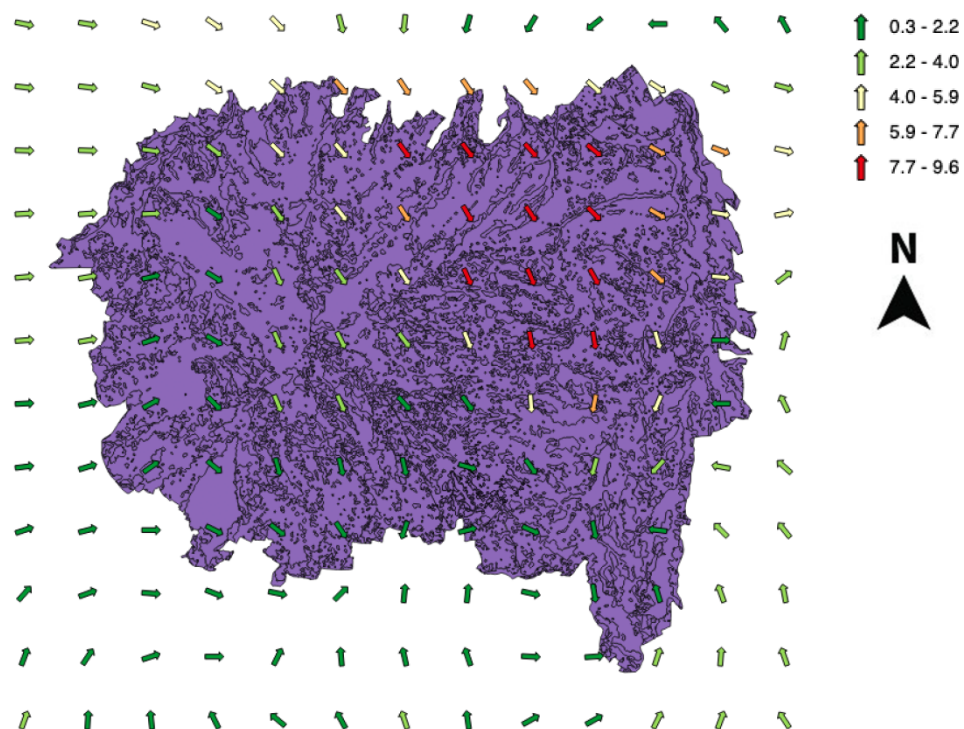


Figura 38. Velocidad [km/h] y dirección del viento en el Volcán Ilaló a las 9:00 AM del 14 de septiembre de 2015

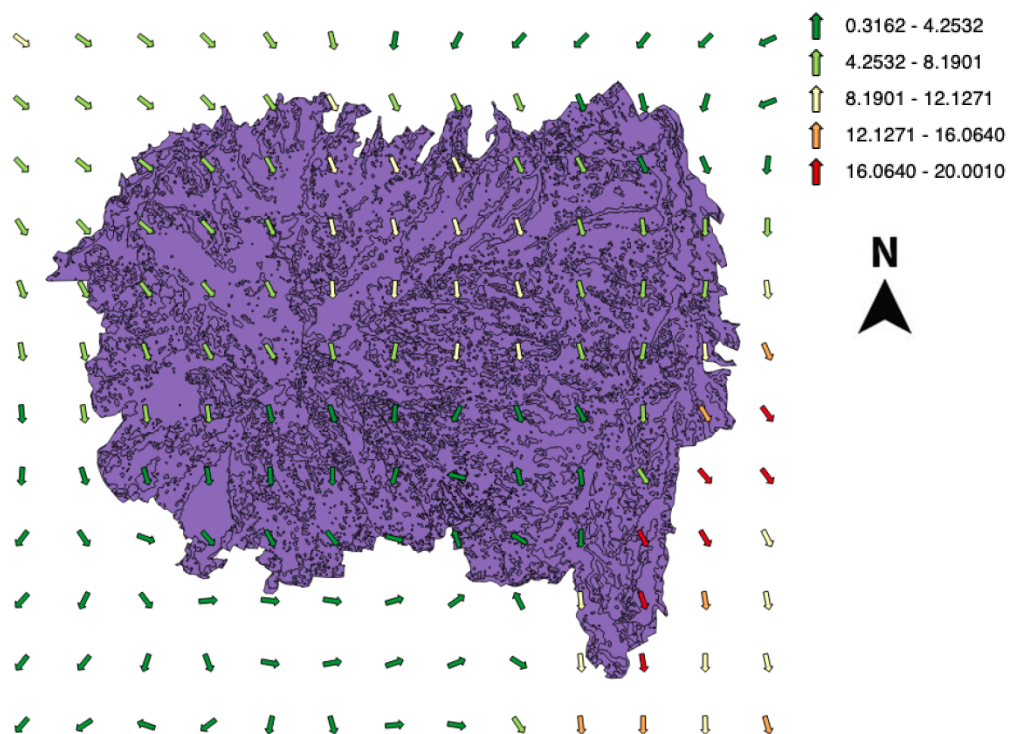


Figura 39. Velocidad [km/h] y dirección del viento en el Volcán Ilaló a las 10:00 AM del 14 de septiembre de 2015

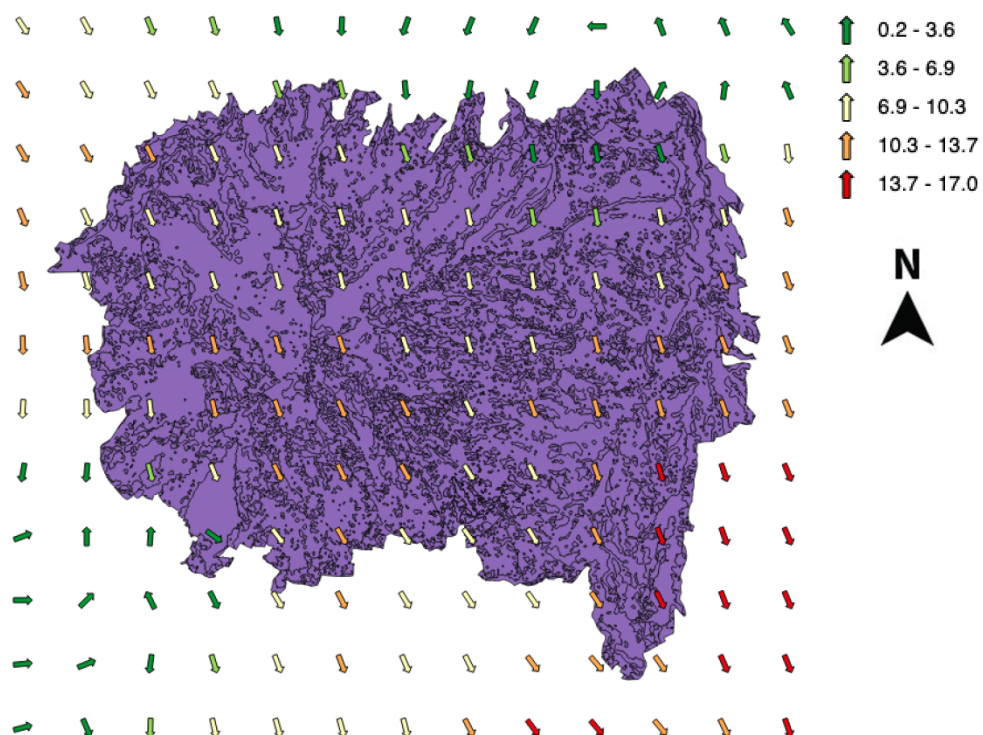


Figura 40. Velocidad [km/h] y dirección del viento en el Volcán Ilaló a las 11:00 AM del 14 de septiembre de 2015

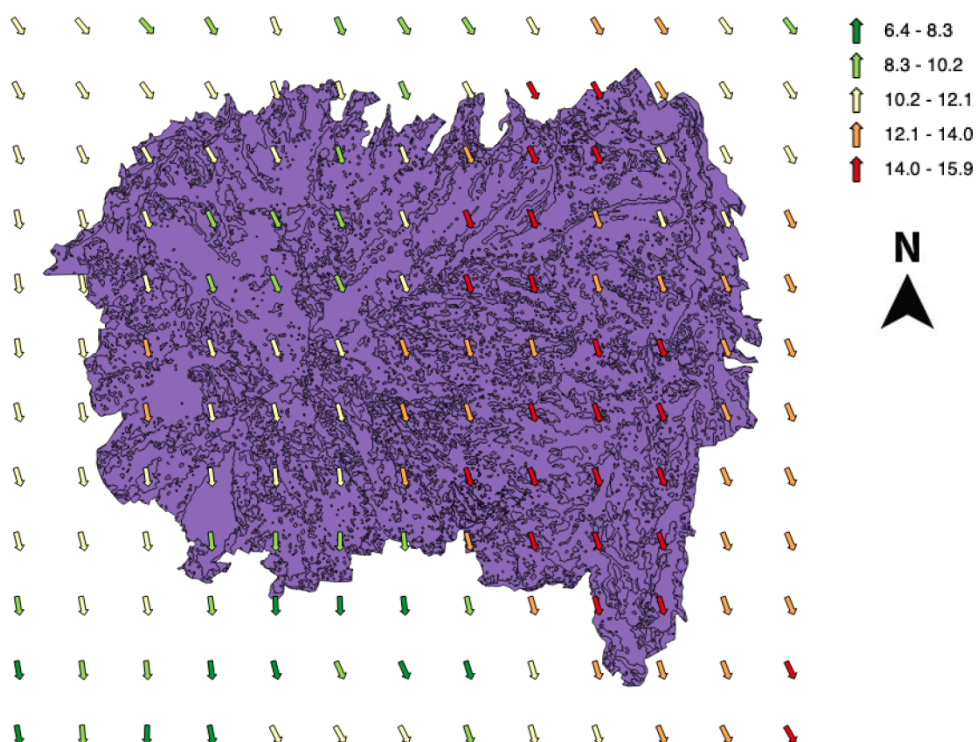


Figura 41. Velocidad [km/h] y dirección del viento en el Volcán Ilaló a las 12:00 AM del 14 de septiembre de 2015

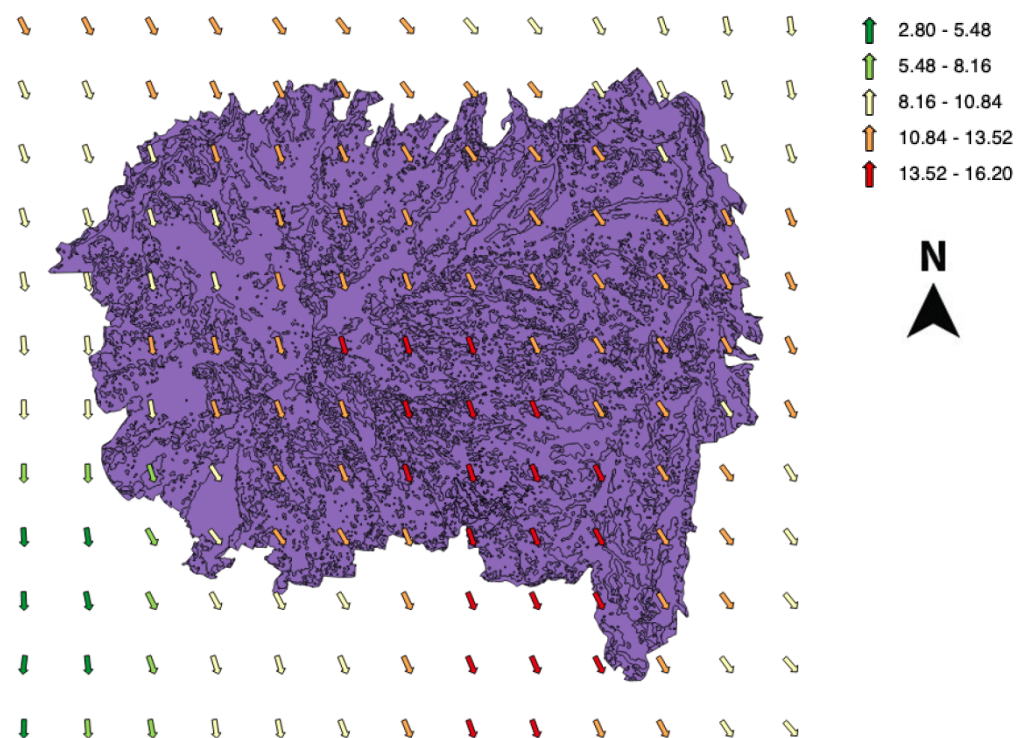


Figura 42. Velocidad [km/h] y dirección del viento en el Volcán Ilaló a las 13:00

AM del 14 de septiembre de 2015

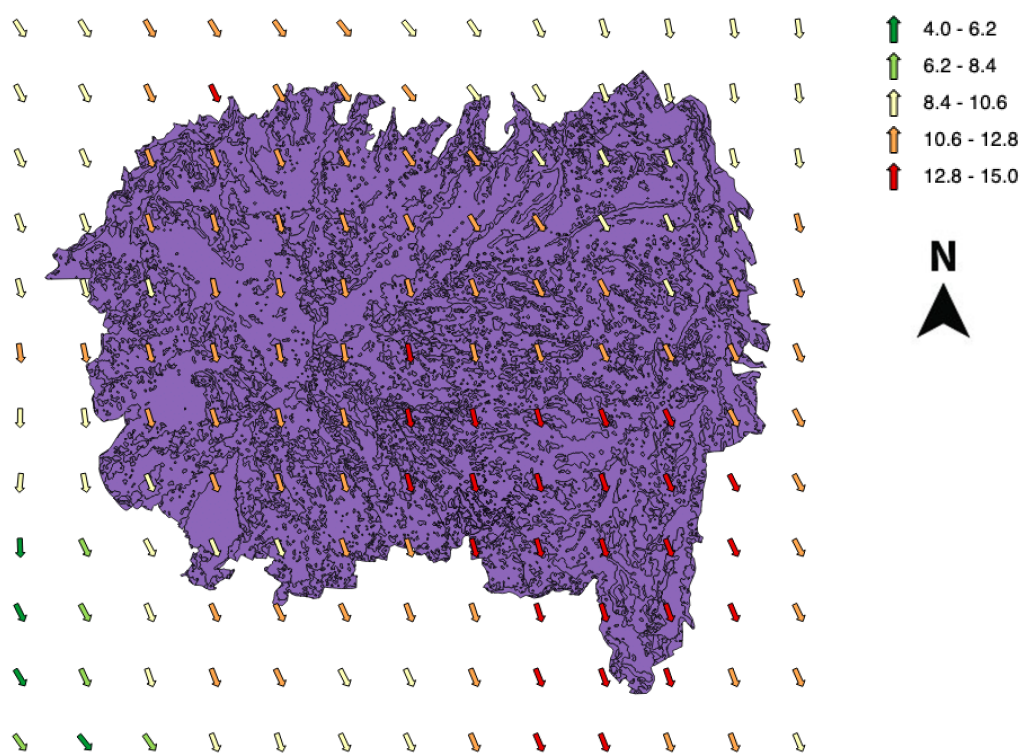


Figura 43. Velocidad [km/h] y dirección del viento en el Volcán Ilaló a las 14:00

AM del 14 de septiembre de 2015

**Tabla 10. Área afectada por el incendio [ha] aplicando el primer método de
contención**

Intervalo de horas [h]	Hora del día [h]	Área afectada por el incendio [ha]
0:00	6:00	0
0:30	6:30	2.995
1:00	7:00	7.055
1:30	7:30	11.188
2:00	8:00	14.596
2:30	8:30	18.937
3:00	9:00	26.304
3:30	9:30	30.734
4:00	10:00	34.599
4:30	10:30	40.941
5:00	11:00	51.197
5:30	11:30	60.827
6:00	12:00	71.456
6:30	12:30	90.91
7:00	13:00	109.296
7:30	13:30	127.699
8:00	14:00	144.561
8:30	14:30	160.524
9:00	15:00	171.414

Tabla 11. Flujo másico de PM2.5 para cada hora de duración aplicando el primer método de contención

Intervalo de horas [h]	Hora del día [h]	Smoldering [ton/h]	Flaming [ton/h]	Flujo másico total [ton/h]
0:00	6:00	4.23E+00	1.57E+00	5.80E+00
0:30	6:30	4.71E+00	2.11E+00	6.83E+00
1:00	7:00	6.12E+00	1.86E+00	7.99E+00
1:30	7:30	5.54E+00	1.46E+00	7.00E+00
2:00	8:00	6.48E+00	1.98E+00	8.46E+00
2:30	8:30	1.06E+01	3.45E+00	1.41E+01
3:00	9:00	5.36E+00	2.79E+00	8.15E+00
3:30	9:30	4.05E+00	3.45E+00	7.51E+00
4:00	10:00	9.52E+00	2.79E+00	1.23E+01
4:30	10:30	1.58E+01	4.37E+00	2.02E+01
5:00	11:00	1.43E+01	4.33E+00	1.86E+01
5:30	11:30	1.52E+01	4.60E+00	1.98E+01
6:00	12:00	2.64E+01	9.12E+00	3.55E+01
6:30	12:30	2.52E+01	9.03E+00	3.42E+01
7:00	13:00	2.48E+01	7.85E+00	3.27E+01
7:30	13:30	2.31E+01	7.30E+00	3.04E+01
8:00	14:00	2.35E+01	6.91E+00	3.04E+01
8:30	14:30	1.60E+01	4.81E+00	2.08E+01
9:00	15:00	6.18E+00	4.61E+00	1.08E+01
TOTAL		2.47E+02	8.44E+01	3.31E+02

Tabla 12. Flujo másico de CO para cada hora de duración aplicando el primer método de contención

Intervalo de horas [h]	Hora del día [h]	Smoldering [ton/h]	Flaming [ton/h]	Flujo másico total [ton/h]
0:00	6:00	5.45E+01	1.04E+01	6.50E+01
0:30	6:30	6.08E+01	1.41E+01	7.48E+01
1:00	7:00	7.89E+01	1.24E+01	9.13E+01
1:30	7:30	7.14E+01	9.71E+00	8.12E+01
2:00	8:00	8.35E+01	1.32E+01	9.67E+01
2:30	8:30	1.37E+02	2.29E+01	1.60E+02
3:00	9:00	6.91E+01	1.85E+01	8.76E+01
3:30	9:30	5.23E+01	2.30E+01	7.52E+01
4:00	10:00	1.23E+02	1.85E+01	1.41E+02
4:30	10:30	2.04E+02	2.91E+01	2.33E+02
5:00	11:00	1.84E+02	2.88E+01	2.13E+02
5:30	11:30	1.96E+02	3.06E+01	2.26E+02
6:00	12:00	3.40E+02	6.06E+01	4.01E+02
6:30	12:30	3.25E+02	6.01E+01	3.85E+02
7:00	13:00	3.20E+02	5.22E+01	3.72E+02
7:30	13:30	2.97E+02	4.85E+01	3.46E+02
8:00	14:00	3.02E+02	4.60E+01	3.48E+02
8:30	14:30	2.07E+02	3.20E+01	2.38E+02
9:00	15:00	7.96E+01	3.07E+01	1.10E+02
TOTAL		3.18E+03	5.61E+02	3.75E+03

Tabla 13. Flujo másico de CO₂ para cada hora de duración aplicando el primer método de contención

Intervalo de horas [h]	Hora del día [h]	Smoldering [ton/h]	Flaming [ton/h]	Flujo másico total [ton/h]
0:00	6:00	3.36E+02	6.93E+02	1.03E+03
0:30	6:30	3.75E+02	9.34E+02	1.31E+03
1:00	7:00	4.87E+02	8.23E+02	1.31E+03
1:30	7:30	4.40E+02	6.45E+02	1.09E+03
2:00	8:00	5.15E+02	8.75E+02	1.39E+03
2:30	8:30	8.46E+02	1.52E+03	2.37E+03
3:00	9:00	4.26E+02	1.23E+03	1.66E+03
3:30	9:30	3.22E+02	1.53E+03	1.85E+03
4:00	10:00	7.57E+02	1.23E+03	1.99E+03
4:30	10:30	1.26E+03	1.93E+03	3.19E+03
5:00	11:00	1.13E+03	1.91E+03	3.05E+03
5:30	11:30	1.21E+03	2.03E+03	3.24E+03
6:00	12:00	2.10E+03	4.03E+03	6.13E+03
6:30	12:30	2.00E+03	3.99E+03	6.00E+03
7:00	13:00	1.97E+03	3.47E+03	5.44E+03
7:30	13:30	1.83E+03	3.22E+03	5.06E+03
8:00	14:00	1.86E+03	3.06E+03	4.92E+03
8:30	14:30	1.27E+03	2.12E+03	3.40E+03
9:00	15:00	4.91E+02	2.04E+03	2.53E+03
TOTAL		1.96E+04	3.73E+04	5.69E+04

Tabla 14. Área afectada por el incendio [ha] aplicando el segundo método de contención

Intervalo de horas [h]	Hora del día [h]	Área afectada por el incendio [ha]
0:00	6:00	0
0:30	6:30	5.135
1:00	7:00	12.938
1:30	7:30	19.825
2:00	8:00	24.292
2:30	8:30	27.368
3:00	9:00	31.762
3:30	9:30	34.414
4:00	10:00	37.565
4:30	10:30	43.996
5:00	11:00	54.135
5:30	11:30	61.63
6:00	12:00	81.679
6:30	12:30	94.661
7:00	13:00	118.717
7:30	13:30	139.276
8:00	14:00	149.773
8:30	14:30	159.659
9:00	15:00	169.217

Tabla 15. Flujo másico de PM2.5 para cada hora de duración aplicando el segundo método de contención

Intervalo de horas [h]	Hora del día [h]	Smoldering [ton/h]	Flaming [ton/h]	Flujo másico total [ton/h]
0:00	6:00	8.11E+00	2.62E+00	1.07E+01
0:30	6:30	1.12E+01	3.60E+00	1.48E+01
1:00	7:00	1.03E+01	3.22E+00	1.35E+01
1:30	7:30	6.49E+00	2.01E+00	8.50E+00
2:00	8:00	4.23E+00	1.28E+00	5.51E+00
2:30	8:30	6.44E+00	1.91E+00	8.35E+00
3:00	9:00	8.57E-01	3.49E+00	4.35E+00
3:30	9:30	4.90E+00	1.50E+00	6.40E+00
4:00	10:00	1.00E+01	3.20E+00	1.33E+01
4:30	10:30	1.51E+01	4.79E+00	1.99E+01
5:00	11:00	1.18E+01	3.11E+00	1.49E+01
5:30	11:30	2.64E+01	9.53E+00	3.59E+01
6:00	12:00	2.09E+01	5.48E+00	2.64E+01
6:30	12:30	3.08E+01	1.15E+01	4.22E+01
7:00	13:00	2.73E+01	9.41E+00	3.67E+01
7:30	13:30	1.59E+01	4.11E+00	2.00E+01
8:00	14:00	1.44E+01	3.98E+00	1.84E+01
8:30	14:30	1.40E+01	3.91E+00	1.79E+01
9:00	15:00	1.68E+01	4.75E+00	2.15E+01
TOTAL		2.56E+02	8.34E+01	3.39E+02

Tabla 16. Flujo másico de CO para cada hora de duración aplicando el segundo método de contención

Intervalo de horas [h]	Hora del día [h]	Smoldering [ton/h]	Flaming [ton/h]	Flujo másico total [ton/h]
0:00	6:00	1.05E+02	1.74E+01	1.22E+02
0:30	6:30	1.44E+02	2.39E+01	1.68E+02
1:00	7:00	1.33E+02	2.14E+01	1.54E+02
1:30	7:30	8.37E+01	1.34E+01	9.71E+01
2:00	8:00	5.46E+01	8.49E+00	6.31E+01
2:30	8:30	8.30E+01	1.27E+01	9.57E+01
3:00	9:00	1.11E+01	2.32E+01	3.42E+01
3:30	9:30	6.31E+01	9.98E+00	7.31E+01
4:00	10:00	1.30E+02	2.13E+01	1.51E+02
4:30	10:30	1.95E+02	3.18E+01	2.27E+02
5:00	11:00	1.52E+02	2.07E+01	1.73E+02
5:30	11:30	3.40E+02	6.34E+01	4.04E+02
6:00	12:00	2.70E+02	3.64E+01	3.06E+02
6:30	12:30	3.96E+02	7.61E+01	4.73E+02
7:00	13:00	3.52E+02	6.26E+01	4.15E+02
7:30	13:30	2.05E+02	2.73E+01	2.33E+02
8:00	14:00	1.86E+02	2.65E+01	2.13E+02
8:30	14:30	1.80E+02	2.60E+01	2.06E+02
9:00	15:00	2.16E+02	3.16E+01	2.48E+02
TOTAL		3.30E+03	5.54E+02	3.85E+03

Tabla 17. Flujo másico de CO₂ para cada hora de duración aplicando el segundo método de contención

Intervalo de horas [h]	Hora del día [h]	Smoldering [ton/h]	Flaming [ton/h]	Flujo másico total [ton/h]
0:00	6:00	6.44E+02	1.16E+03	1.80E+03
0:30	6:30	8.89E+02	1.59E+03	2.48E+03
1:00	7:00	8.20E+02	1.42E+03	2.24E+03
1:30	7:30	5.16E+02	8.90E+02	1.41E+03
2:00	8:00	3.37E+02	5.64E+02	9.01E+02
2:30	8:30	5.12E+02	8.45E+02	1.36E+03
3:00	9:00	6.81E+01	1.54E+03	1.61E+03
3:30	9:30	3.89E+02	6.63E+02	1.05E+03
4:00	10:00	7.99E+02	1.42E+03	2.21E+03
4:30	10:30	1.20E+03	2.12E+03	3.32E+03
5:00	11:00	9.40E+02	1.38E+03	2.32E+03
5:30	11:30	2.10E+03	4.21E+03	6.31E+03
6:00	12:00	1.66E+03	2.42E+03	4.09E+03
6:30	12:30	2.44E+03	5.06E+03	7.50E+03
7:00	13:00	2.17E+03	4.16E+03	6.33E+03
7:30	13:30	1.27E+03	1.82E+03	3.08E+03
8:00	14:00	1.15E+03	1.76E+03	2.91E+03
8:30	14:30	1.11E+03	1.73E+03	2.84E+03
9:00	15:00	1.33E+03	2.10E+03	3.43E+03
TOTAL		2.03E+04	3.68E+04	5.72E+04

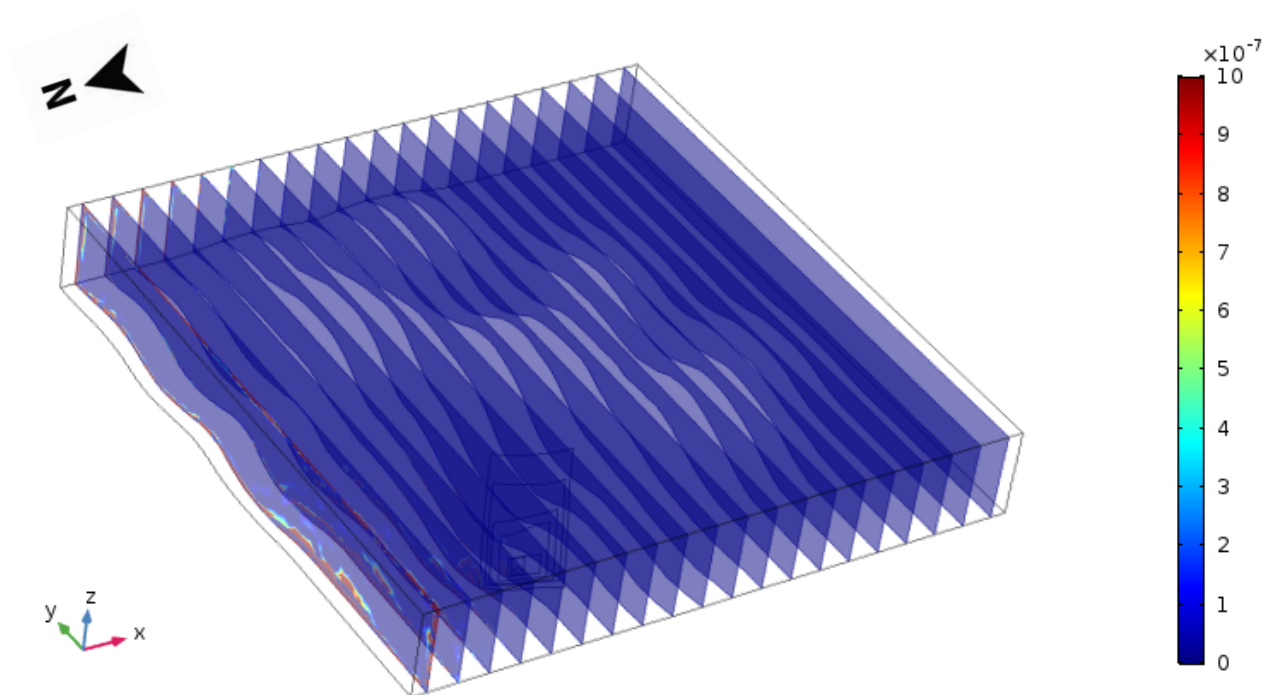


Figura 44. Concentración de CO₂ [mol/m³] en la hora 6 del 14 de septiembre de 2015 mostrando un transporte de la especie hacia el norte

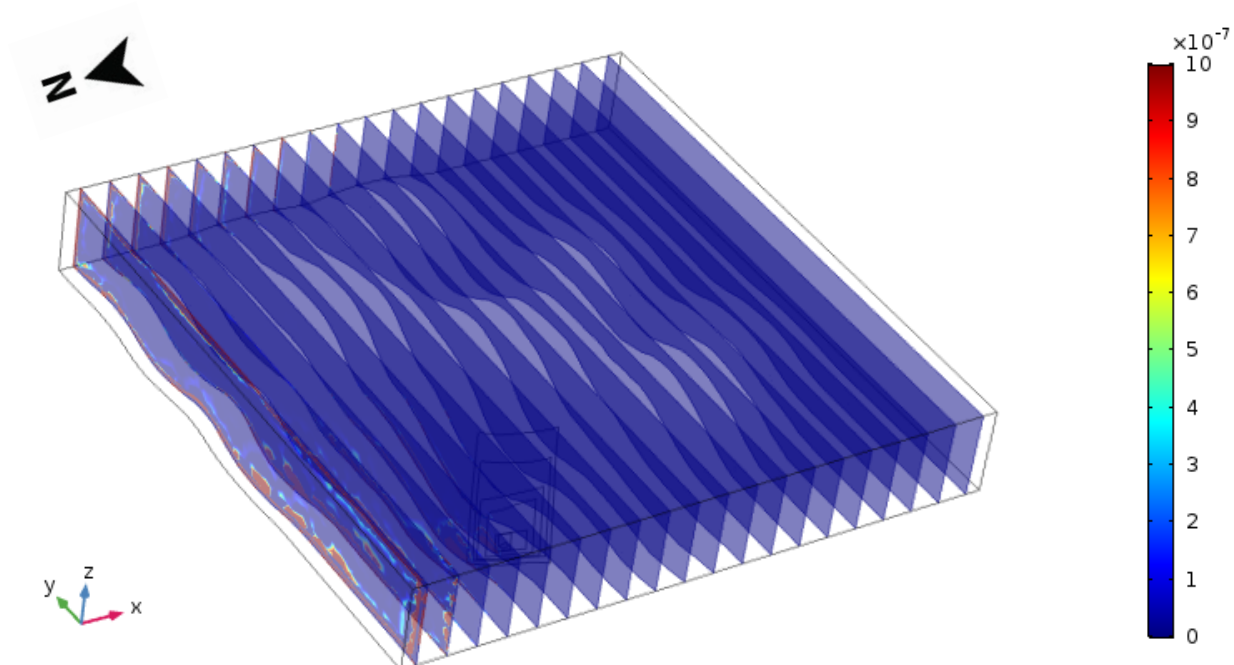


Figura 45. Concentración de CO₂ [mol/m³] en la hora 7 del 14 de septiembre de 2015 mostrando un transporte de la especie hacia el norte

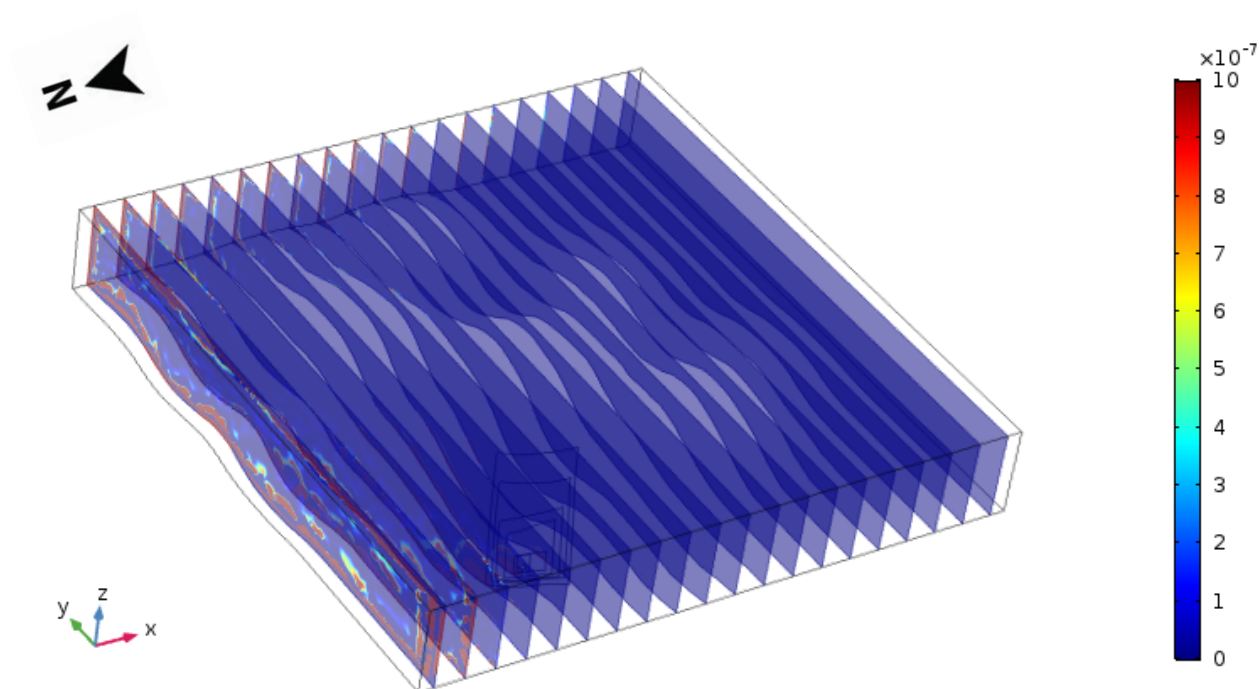


Figura 46. Concentración de CO₂ [mol/m³] en la hora 8 del 14 de septiembre de 2015 mostrando un transporte de la especie hacia el norte

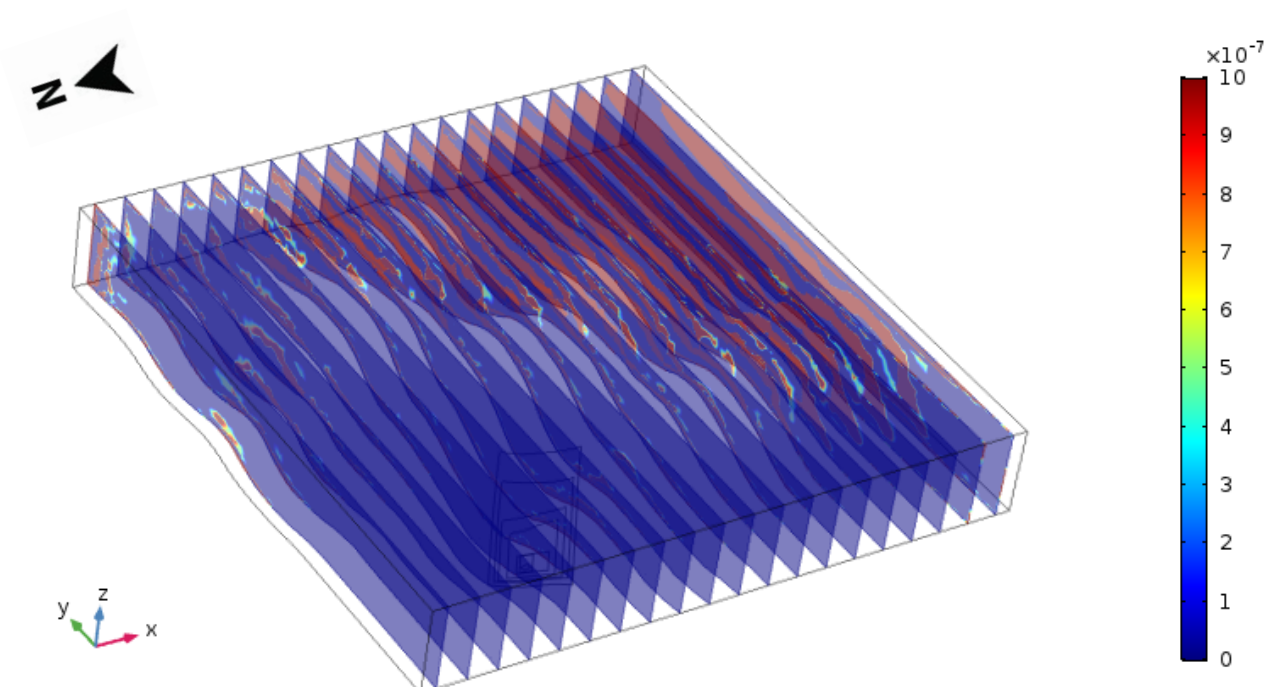


Figura 47. Concentración de CO₂ [mol/m³] en la hora 9 del 14 de septiembre de 2015 mostrando un transporte de la especie hacia el sur

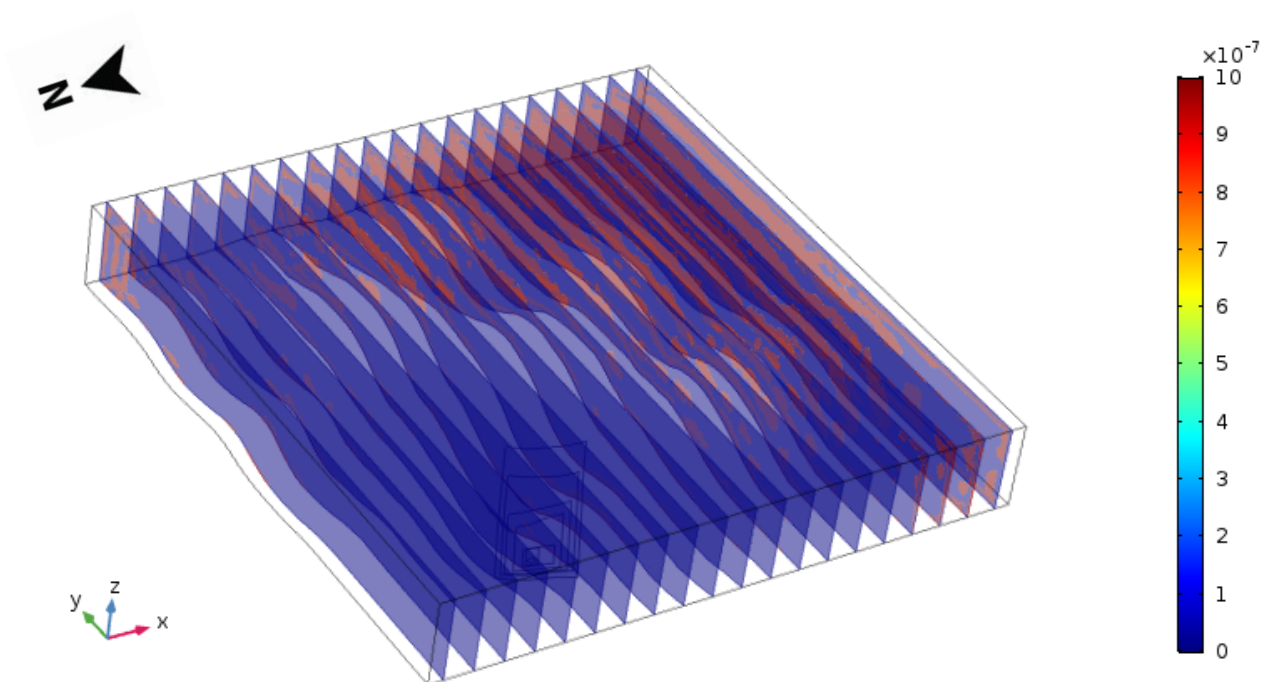


Figura 48. Concentración de CO₂ [mol/m³] en la hora 10 del 14 de septiembre de 2015 mostrando un transporte de la especie hacia el sur

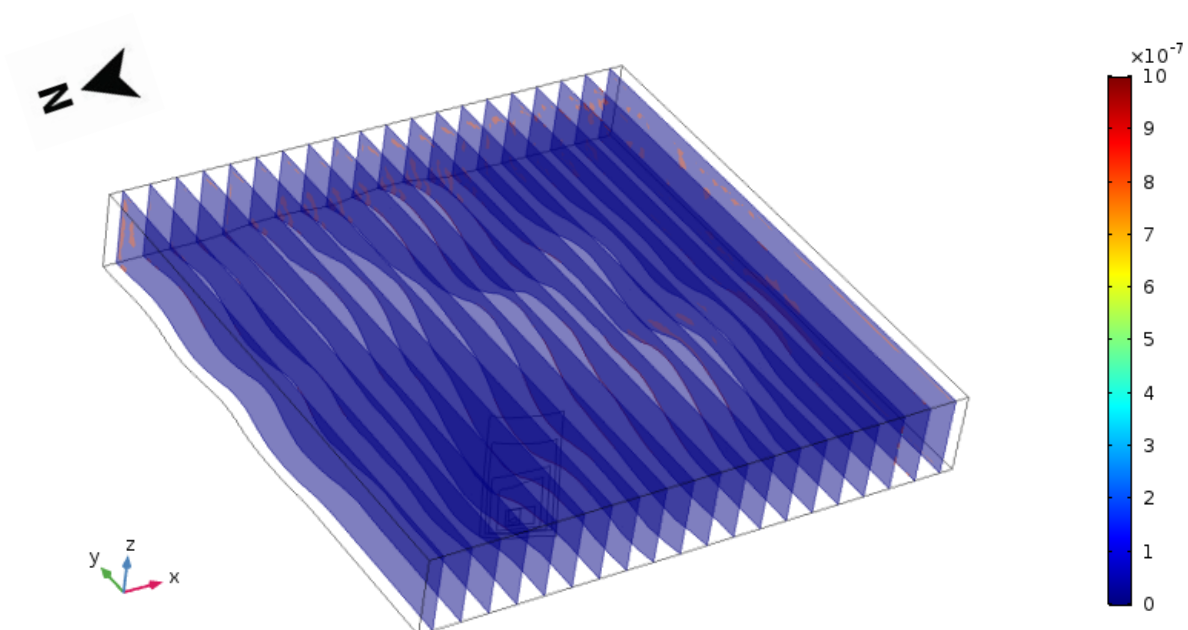


Figura 49. Concentración de CO₂ [mol/m³] en la hora 11 del 14 de septiembre de 2015 mostrando un transporte de la especie hacia el sur y difusión en el aire

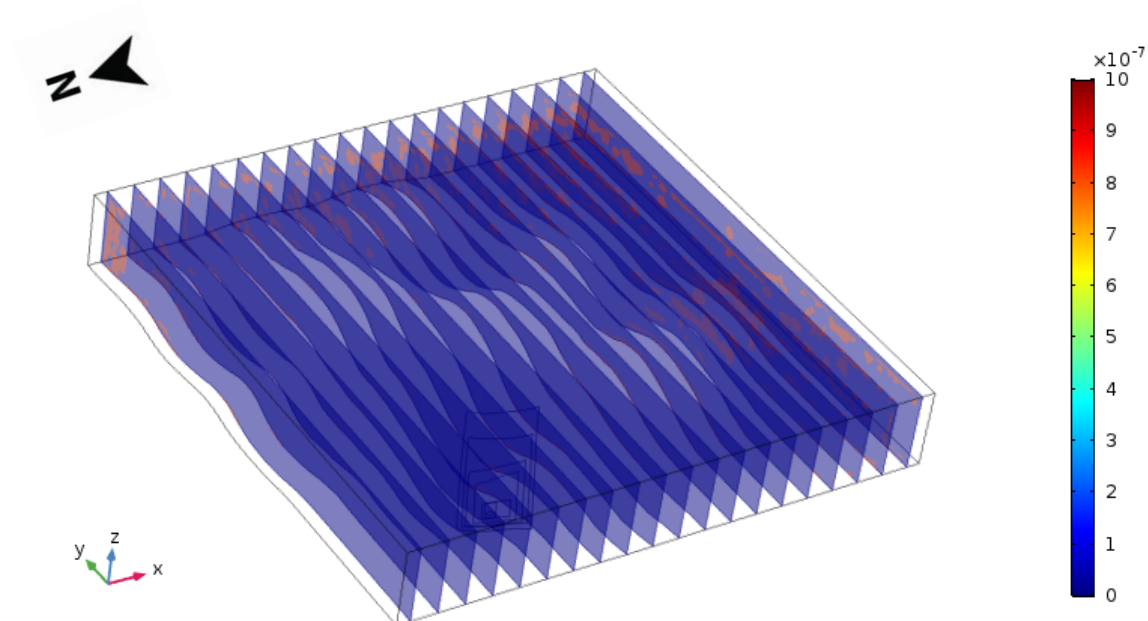


Figura 50. Concentración de CO₂ [mol/m³] en la hora 12 del 14 de septiembre de 2015 mostrando un transporte de la especie hacia el sur y difusión en el aire

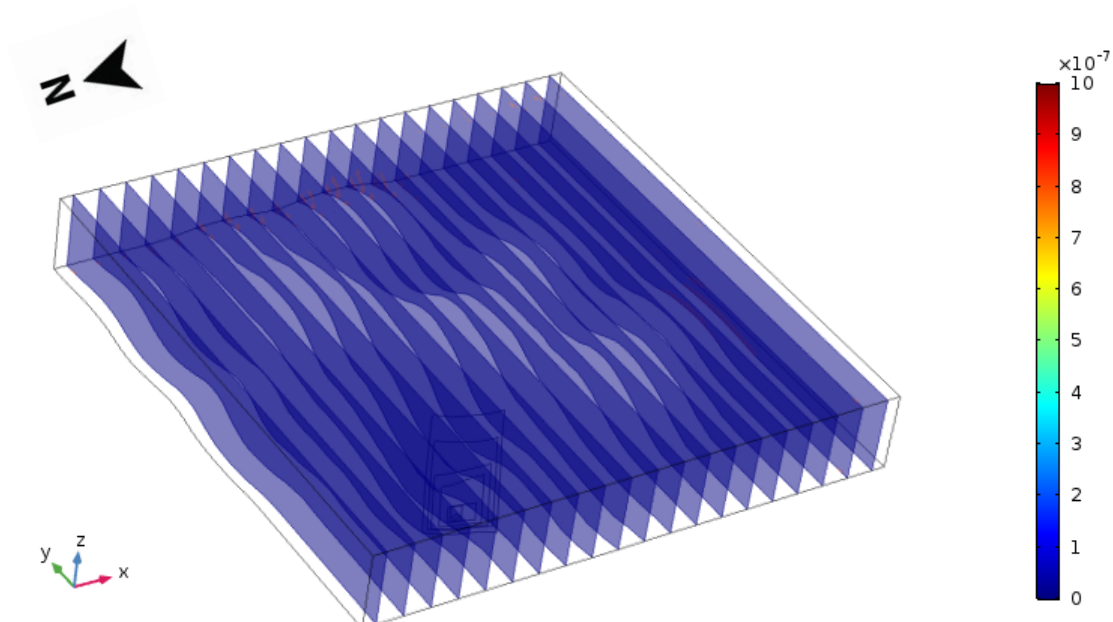


Figura 51. Concentración de CO₂ [mol/m³] en la hora 13 del 14 de septiembre de 2015 mostrando un transporte de la especie hacia el sur y difusión en el aire

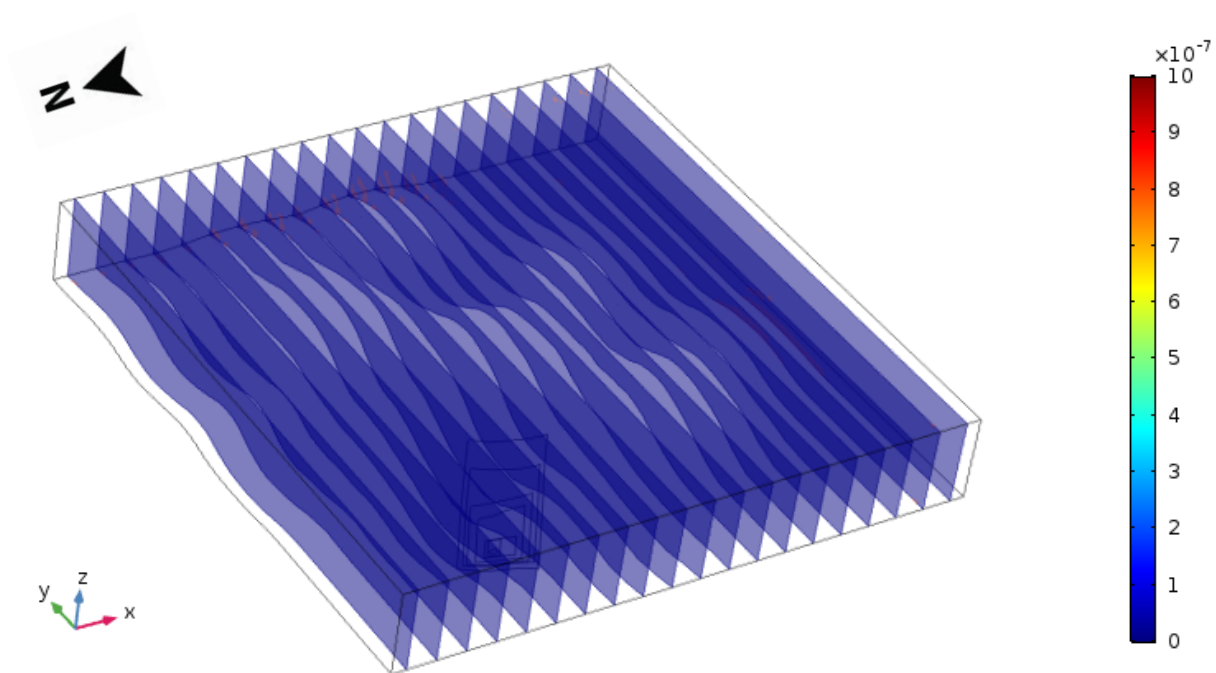


Figura 52. Concentración de CO₂ [mol/m³] en la hora 14 del 14 de septiembre de 2015 mostrando un transporte de la especie hacia el sur y difusión en el aire